AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**COMPARAÇÃO ENTRE A SOLDAGEM DE CHAPAS FINAS DE TÂNTALO E MONEL 400
COM LASER PULSADO DE ND:YAG E COM LASER CONTÍNUO DE FIBRA**

Arthur Maximo

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Materiais**

Orientador:

Prof. Dr. Wagner de Rossi

São Paulo

2015

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**COMPARAÇÃO ENTRE A SOLDAGEM DE CHAPAS FINAS DE TÂNTALO E MONEL 400
COM LASER PULSADO DE ND:YAG E COM LASER CONTÍNUO DE FIBRA**

Arthur Maximo

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Materiais**

Orientador:

Prof. Dr. Wagner de Rossi

Versão Corrigida
Versão Original disponível no IPEN

São Paulo
2015

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai, Davi Maximo da Silva, que me ensinou o valor da família, da educação, do trabalho e da vida!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, pelo conhecimento e pela força que Ele me concedeu e que foram essenciais para que eu superasse todos os desafios durante a execução deste trabalho.

Agradeço a minha esposa, Iris e minha filha, Camila, pelo incentivo e pelo apoio em minha vida, que acreditaram em mim em todos os momentos, sem exceções.

Agradeço às minhas irmãs, Giovanna e Fernanda, que desde de sempre encheram minha vida com alegria, amizade e solidariedade, nos momentos difíceis, moderados e fáceis, sempre com muito amor e fraternidade.

Agradeço a meu tio, Prof. Dr. José Marinho do Nascimento, pelo seu empenho em mostrar-me as maravilhas da carreira científica desde os primórdios de minha existência.

Agradeço ao meu amigo e colega de profissão, Ms. Anderson Oliveira Ferreira, por toda ajuda e direcionamento em minha carreira técnico-científica.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Wagner de Rossi, pela paciência e confiança que me conduziram ao longo deste trabalho, que mesmo nas dificuldades apresentadas pela distância entre nós, nunca me deixou perder o foco e a motivação para conclusão deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Milton Sergio Fernandes de Lima, que me acolheu e abriu as portas de seu laboratório no Instituto de Estudos Avançados (IEAv) do Departamento de Ciência e Tecnologia da Aeronáutica (DCTA).

Agradeço ao Prof. Dr. Mauricio David Martins das Neves por toda a ajuda nas análises mecânicas, metalúrgicas e microestruturais de minhas amostras.

Agradeço ao meu “irmão de mestrado”, Ms. Alessandro Francelino Nogueira, que foi um baluarte de amizade e conhecimento antes e durante deste projeto.

Agradeço aos colegas do Centro de Tecnologia SENAI em Solda, em especial para meus amigos Dr. Lincoln Silva Gomes e Eng. Mauricio Ogawa, por permitirem que eu concluísse este trabalho sem ônus nenhum a minha carreira profissional.

Agradeço aos meus colegas de trabalho, Leandro, José Geraldo e Eng. Rafael, que contribuíram na execução dos experimentos deste trabalho.

Agradeço a todos meus colegas do Centro de Laser e Aplicações do IPEN, que contribuíram direta ou indiretamente para a formação do arcabouço técnico-científico que culminou neste trabalho.

Agradeço ao IPEN, pela infraestrutura cedida e por todo apoio administrativo durante esta caminhada.

Agradeço ao CAPES, pelo apoio financeiro, sem o qual não seria possível realizar este projeto.

Comparação Entre a Soldagem de Chapas Finas de Tântalo e Monel 400 com Laser Pulsado de Nd:YAG e com Laser Contínuo de Fibra.

Arthur Maximo

RESUMO

Neste trabalho foram realizados experimentos de soldagem de chapas de Tântalo e Monel 400 com 100 µm de espessura. Foram realizadas soldas em um laser de Nd:YAG operando em modo pulsado e em um Laser de Fibra operando em modo contínuo. Em seguida a microestrutura das amostras foram analisadas através de microscopia ótica e foram realizados ensaio de microdureza Vickers. As amostras que apresentaram melhores resultados foram submetidas a ensaios de tração e a ensaios de corrosão. Após análise dos resultados observou-se que a soldagem a laser apresenta muitos benefícios em relação a outros processos convencionais para chapas finas. A soldagem no modo pulsado apresentou maior relação de aspecto se comparado a soldagem em modo contínuo. A soldagem em modo contínuo apresentou uma velocidade de soldagem muito superior ao modo pulsado. Os resultados indicaram que a soldagem no modo pulsado apresenta maior aplicabilidade para chapas finas, devido à necessidade um controle preciso sobre a intensidade aplicada.

Palavras-chave: soldagem a laser; Tântalo; Monel; chapas finas; corrosão.

Comparison Between Welding of Thin Sheets of Tantalum and Monel 400 With Pulsed Nd:YAG Laser and Continuous Fiber Laser.

Arthur Maximo

ABSTRACT

This work carried out welding experiments of Tantalum and Monel 400 plates with 100 mm thickness. Welds were made with an Nd: YAG laser operating in a pulsed mode and in a fiber laser operating in continuous mode. Then the microstructure of the samples were analyzed by optical microscopy and were performed Vickers microhardness test. Samples that showed better results were subjected to tensile tests and the corrosion tests. After analysis of the results showed that the laser welding offers many benefits over other conventional processes for thin sheets. The welding in pulsed mode presented in superior aspect ratio compared to welding in continuous mode. The welding in continuous mode showed a much higher welding speed to pulsed mode. The results indicated that the welding in pulsed mode shows more applicability for sheet metal, due the need of a precise control of applied intensity.

Keywords: laser welding; tantalum; Monel; thin sheets; corrosion.

Sumário

1. Introdução	9
1.1. Soldagem a Laser	10
1.1.1. Fundamentos da Soldagem a Laser	10
1.1.2. Técnicas de Soldagem a Laser	12
1.1.2.1. Soldagem por Condução	13
1.1.2.2. Soldagem por Penetração (Keyhole)	16
1.2. Tipos de Lasers	18
1.2.1. Laser de Nd:YAG	18
1.2.2. Laser de Fibra	19
1.3. Materiais	20
1.3.1. Monel 400	20
1.3.2. Tântalo	21
2. Objetivos	23
3. Materiais e Métodos	24
3.1. Equipamentos	24
3.2. Análise da Composição Química dos Materiais	25
3.3. Testes Preliminares	26
3.4. Desenvolvimento das Soldagens	27
4. Resultados e Discussões	33
4.1. Monel 400	33
4.1.1. Análise por Microscopia Ótica	33
4.1.2. Perfilometria Ótica	48
4.1.3. Ensaios de Microdureza	51
4.1.4. Ensaios de Tração	53
4.1.5. Ensaios de Corrosão	63
4.2. Tântalo	65
4.2.1. Análise por Microscopia Ótica	65
4.2.2. Perfilometria Ótica	75
4.2.3. Ensaios de Microdureza	78
4.2.4. Ensaios de Tração	79
4.2.5. Ensaios de Corrosão	88

5. Conclusões	91
5.1. Sugestões de Trabalhos Futuros	92
Referências Bibliográficas	94

1. INTRODUÇÃO

A miniaturização de máquinas e dispositivos já é uma realidade atual cujos aprimoramentos tendem a ser cada vez mais evidentes com o forte desenvolvimento das nanotecnologias. Na área de defesa, são vários exemplos de sistemas nos quais a miniaturização oferece uma vantagem evidente em relação às tecnologias existentes. Um exemplo são os micro-veículos aéreos (MVA) em desenvolvimento por várias nações ao redor do mundo e também por empresas [1].

Um MVA, também chamado de Robobug, é um veículo aéreo não-tripulado (VANT) cujas dimensões são bastante reduzidas, como alguns centímetros de comprimento. Alguns desses MVA já têm a dimensão de um inseto grande e cumprem missões bem específicas, como a busca por vítimas de desmoronamento, passando por entre as fendas, ou espionagem.

Além dos problemas intrínsecos à miniaturização dos sistemas embarcados, uma das questões mais pertinentes se refere ao processo de fabricação da estrutura dessas máquinas em miniatura. Os processos convencionais de fabricação não são apropriados para dimensões muito pequenas, ou para materiais muito duros ou muito moles ou ainda para geometrias complexas. O laser surge como uma solução para trabalhar uma grande gama de materiais em geometrias dificilmente atingíveis por ferramentas mecânicas. Em particular, a soldagem a laser permite unir pequenas secções de sistemas miniaturizados com precisão, repetitividade e com poucos defeitos, sendo, portanto apropriado para estruturas de pequeno porte.

A soldagem a laser já tem sido utilizada com sucesso para soldagem de carrocerias automotivas, em revestimentos de aeronaves e na área metal-mecânicas [2] [3] [4] [5] [6] e vem sendo utilizada como um importante processo de manufatura. Ela pode ser utilizada tanto no modo contínuo quanto no modo pulsado [7] [8]. Também pode ser utilizada na união de lâminas muito finas com o intuito de encapsular sensores e elementos que são utilizados em ambientes agressivos, como sensores de fluxo, pressão e temperatura que são usados para monitoramento de processos químicos. Estas lâminas são de materiais resistentes a ambientes agressivos, como as ligas de níquel, com espessuras

entre 50 e 100 μm . Precisam ser soldadas entre si, e sobre base espessa do material do sensor, geralmente de aço inoxidável AISI 316 ou AISI 304. No entanto, os problemas observados quando as peças são de pequenas dimensões ainda é um desafio tecnológico em nível mundial. Os problemas mais comuns observados são empenamentos e distorções, poros e trincas e estão intimamente ligados ao conhecimento da técnica e dos materiais envolvidos.

O estudo da soldagem a laser aplicada aos materiais Tântalo e Monel 400, têm relação direta com os setores priorizados pela Estratégia Nacional de Defesa, a saber: o espacial, o cibernético e o nuclear. Por exemplo, a tecnologia pode ser utilizada na fabricação de satélites de pequeno e médio porte ou de grades separadores de elementos combustíveis, conforme preconizado no documento Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2012-2015 [9]. A microssoldagem pode ainda auxiliar na fabricação de sondas miniaturizadas que são aplicadas na prospecção de petróleo e gás natural, tanto para visualização remota quanto para medidas de pressão e temperatura em condições extremas.

1.1 Soldagem a Laser

1.1.1 Fundamentos da Soldagem a Laser

O feixe laser possui propriedades especiais que podem ser manipuladas e, assim, se tornarem apropriadas para o uso na maioria das áreas [10] [11]. As diferentes fontes de laser cobrem uma gama extremamente ampla do espectro eletromagnético, desde o ultravioleta extremo até o infravermelho distante, e, além disso, o feixe de laser pode ser modulado no tempo (contínuo e pulsado) e a seção transversal do feixe também pode ser adequado, de forma a satisfazer as condições exigidas por uma aplicação específica. Esses recursos permitem focalizar o feixe laser a áreas inferiores a 1 μm^2 , podendo fazer uso de centenas de joules de energia por pulso, e obter tempos de interação desde o contínuo até alguns femtossegundos.

Esta ampla gama de possibilidades permite um controle extremamente preciso do fluxo de energia em um ponto específico de um determinado material. Isto por sua vez permite um controle razoavelmente preciso sobre a dinâmica das transformações de fase na região onde o laser incide e permite a sua utilização numa variedade muito ampla de aplicações [12] [13].

A soldagem a laser tem sido amplamente utilizada na indústria de manufatura [14], e as principais vantagens são: a pequena zona termicamente afetada (ZTA) e alta proporção de aspecto da solda na soldagem de penetração. As características únicas da luz laser, juntamente com modernos equipamentos usados oferecem grandes vantagens, tais como altas taxas de processamento, automação completa, acesso a partes difíceis da peça, uma fácil adaptação do processo para um tipo específico de material ou junta. A principal desvantagem é o alto investimento no equipamento e capacitação de pessoal. Os principais fatores responsáveis pelo sucesso desta tecnologia são melhorias nas fontes de laser, nos controles dos sistemas de transmissão dos feixes e a melhor compreensão teórica do processo [15]. O progresso nessas áreas tem permitido que a soldagem a laser seja utilizada para grandes e pequenas peças de uma variedade de materiais e aplicações.

Uma aplicação muito específica da soldagem a laser é soldagem de chapas metálicas muito finas. O pequeno diâmetro do ponto focal permite que a temperatura de evaporação seja atingida, mesmo em baixa potência e com velocidades de processamento elevadas. Isto permite a minimização do aporte térmico e evita a reflexão deste fluxo de calor pela superfície inferior da folha fina e impede que o processo seja comprometido. Cordões de solda em aço inoxidável com 25 μm de espessura a uma velocidade de 2 m/s, com um ponto focal de 22 μm de diâmetro tem sido feito com a potência do laser de apenas 15 W [16].

A soldagem a laser é caracterizada por um equilíbrio delicado entre o aquecimento e o resfriamento de uma quantidade de material, o qual está em forma de uma poça fundida e permanece estável até sua solidificação. O objetivo da soldagem a laser é criar uma poça de fusão por absorção da radiação do feixe laser incidente, permitindo seu crescimento até o tamanho desejado, e, em

seguida, propagar esta poça através da interface sólida, eliminando a linha de junção original entre os componentes a serem unidos.

As possibilidades de obtenção de uma solda a laser com precisão e alta qualidade são enormes. Isto é devido ao fato de vários parâmetros do sistema poderem ser controlado com precisão, desde o modo de geração do feixe laser até os efeitos deste feixe no material.

A manutenção de um bom equilíbrio entre a entrada e a perda de calor depende da constante absorção de radiação laser e a dissipação uniforme do calor gerado pela peça a ser soldada. Para manter estes fatores constantes, não é fácil. O feixe de laser é muitas vezes interrompido devido à formação de vapor do material no ponto focal, afetando assim a absorção da radiação de laser. Sob certas condições, este vapor pode transformar-se em plasma que absorve e espalha o feixe, atenuando-o severamente. No material a ser soldado, a dissipação de calor constante, a partir da poça de fusão dentro da peça, requer uma geometria estável entre a interface do material fundido e o material adjacente.

1.1.2 Técnicas de Soldagem a Laser

Existem duas principais técnicas de a soldagem a laser: por condução térmica e por penetração (também chamada de soldagem por *keyhole*), como é apresentado na **Figura 1**. A diferença básica entre as duas técnicas é a superfície da poça de fusão, que permanece intacta na soldagem por condução e, na soldagem por penetração, é alterada, devido a interação do feixe com o material fundido.

Figura 1: diagrama esquemático das técnicas de soldagem laser.

A técnica de soldagem por condução oferece uma maior estabilidade para o processo de soldagem. Nesta técnica, a radiação laser não penetra no material que está sendo soldado, resultando assim em soldagens menos susceptíveis a defeitos, tais como a formação de poros durante a soldagem. A soldagem por penetração requer uma densidade de potência extremamente alta de aproximadamente 1 MW/cm^2 . Neste processo, não somente funde o metal, mas também produz vapor na região da soldagem.

As técnicas de soldagem por condução e por penetração podem ser realizadas com lasers pulsados e contínuos. Estas técnicas também podem ser utilizadas para soldagem por pontos.

Na soldagem com laser pulsado, a duração do pulso do laser e a intensidade do feixe de laser sobre a peça a ser soldada são os principais parâmetros que definem se a soldagem é por condução ou por penetração.

1.1.2.1 Soldagem por Condução

Na soldagem por condução o feixe funde o material sem evapora-lo. O feixe laser é absorvido pela superfície e somente o calor gerado penetra o material. Nestas condições, a iniciação da fusão da superfície pode ser estimada a partir de um simples modelo apresentado na **Figura 2**.

Figura 2: diagrama esquemático da superfície do material sendo aquecida por um feixe laser com uma distribuição gaussiana de intensidade.

A temperatura no centro feixe laser focalizado é dado pela **Equação (1)**:

$$T(0,t) - T_0 = \left[A_b \cdot I(0) w / K \cdot (2\pi)^{\frac{1}{2}} \right] \cdot \tan^{-1} \cdot (8 \cdot k \cdot t / w^2)^{1/2} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde K é a condutividade térmica; k é a difusividade térmica; w é o raio do feixe gaussiano; T_0 é a temperatura ambiente; t tempo; I intensidade do feixe laser e A_b é absorção.

Se $T(0,t) = T_m$ (temperatura de fusão), então a intensidade do feixe laser, $I_m(0)$, necessária para produzir a fusão no tempo t pode ser obtida. $I_m(0)$ pode ser considerada independente do tempo quando $t \gg w^2 / 8 \cdot k$ ou quando a distância de difusão térmica $\sqrt{k \cdot t} \gg w$. Para um determinado tempo t, obtém-se como resultado $A_b \cdot I_m(0)$.

Observa-se que o valor de $I_m(0)$ pode ser reduzido com o aumento da absorção A_b . Também pode ser observado na **Equação (1)** que o raio do feixe laser focalizado na superfície, w , apresenta grande influência sobre $I_m(0)$ quando t é longo, mas pouca influência em processos de pulsos curtos (pulsos com duração maiores que picossegundos). Estes resultados não levam em conta calor latente de fusão, então, os resultados devem ser considerados aproximados.

Uma estimativa da profundidade de penetração z_m da poça de fusão pode ser obtida sobre as condições da soldagem por ponto, nas qual a fusão é levada em consideração. Isto é, se t_m é o tempo para o qual $T(z=0)=T_m$, então temos a **Equação (2)**:

$$z_m \sim [0,16 \cdot A_b \cdot I / \rho \cdot L] \cdot (t - t_m) \quad \text{Equação (2)}$$

Onde ρ é a densidade do material na temperatura de fusão e L é o calor latente de fusão. A **Equação (2)** só é válida quando $t_m < 8k/w^2$.

Quando a peça é movimentada à uma velocidade V em relação ao feixe laser que transporte a potência P e é absorvido pela superfície ($A_b \cdot P$), o limiar para a soldagem por condução pode ser obtido pelo resultado aproximado da **Equação (3)**:

$$T(r) - T(0) = [A_b \cdot P / 2\pi \cdot K \cdot r] \cdot \exp\{-[V(x + r)/2k]\} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde $r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$.

A **Equação (3)** é a exata solução para o ponto com a potência $A_b \cdot P$ e tem uma singularidade em $r=0$. Esta equação pode ser usada para estimar o limiar de soldagem para um feixe gaussiano com raio w , levando em consideração $T=T_m$ para $r=w(2)^{1/2}$ e $x=0$. Assim, a velocidade crítica de soldagem V_m pode ser obtida pela **Equação (4)**:

$$V_m = - \left[2 \cdot (2)^{\frac{1}{2}} \cdot k / w \right] \cdot \ln. [(T_m - T_0) \cdot 2 \cdot (2)^{\frac{1}{2}} \cdot \pi \cdot K \cdot w / A_b \cdot P] \quad \text{Equação (4)}$$

Observa-se um sinal negativo no lado esquerdo da **Equação (4)**; assim, os resultados permitidos para V_m são para potências superiores que o limiar de potência P^* , que pode ser obtido pela **Equação (5)**:

$$P > P^* = [(T_m - T_0) \cdot 2 \cdot (2)^{\frac{1}{2}} \cdot \pi \cdot K \cdot w / A_b] \quad \text{Equação (5)}$$

1.1.2.2 Soldagem por Penetração (*Keyhole*)

A soldagem com alta profundidade de penetração é obtida através da aplicação de feixes lasers de alta densidade de energia, que evaporam o material através de sua espessura. A abertura formada é normalmente mencionada como “keyhole” e está rodeada por material metálico fundido.

Uma coluna de vapor forma-se no *keyhole* que está cercado por uma poça liquida, como pode ser observado na **Figura 3**.

Figura 2: diagrama esquemático da soldagem por penetração.

Quando esta coluna é deslocada, o material em frente ao *keyhole* é fundido diretamente no sentido da espessura da peça. O metal liquido flui ao

longo das paredes do *keyhole* e solidifica na parte de trás. A coluna de vapor é mantida estável como resultado do equilíbrio entre densidade de energia do feixe laser e a velocidade de soldagem. A razão de aspecto, que é a relação entre a profundidade e a largura do cordão de solda, podem chegar a valores iguais ou maiores que 4.

Na soldagem por penetração, alguns aspectos devem ser observados com especial atenção. Um desses é o fechamento intermitente do *keyhole*, o que pode resultar em porosidade. A alta densidade de energia ou a baixa velocidade de soldagem causam a instabilidade do *keyhole*, e isto pode causar excessiva formação de gotas de material fundido durante a soldagem. Por outro lado, a baixa densidade de energia ou alta velocidade de soldagem levam a energia ou tempo de interação insuficiente para evaporação do material. Isto torna a geração e manutenção do *keyhole* muito difíceis.

A formação do *keyhole* é muito importante na soldagem a laser por penetração. A modo como isto ocorre ainda não é bem compreendido, porém certamente começa com a evaporação na superfície da poça de fusão. Para uma superfície plana e um feixe incidente com um perfil de intensidade gaussiano, a solução é obtida através da **Equação (1)** com $T(0,t)=T_v$, a temperatura de evaporação. Assim, obtemos a **Equação (6)**:

$$T_v - T_0 = [A_{bv} \cdot I(0) \cdot w / K_v \cdot (2\pi)^{\frac{1}{2}}] \cdot \tan^{-1}(8 \cdot k_v \cdot t / w^2)^{1/2} \quad \text{Equação (6)}$$

Onde as subscrições referem-se a valores na temperatura de evaporação ou próximas dela.

De modo similar à fusão, o limiar de evaporação depende do raio do feixe laser e a duração do pulso, mas independe do tempo para pulsos longos. Face ao exposto, supõem-se novamente que a absorção da superfície é independente da duração. A ruptura da superfície quando a evaporação inicia geralmente leva a um aumento do acoplamento térmico e a possibilidade da “fuga térmica”, a partir do ponto focal do feixe laser in direção do *keyhole* que está sendo gerado.

Nas intensidades típicas para soldagem a laser de metais, o *keyhole* pode ser estabelecido rapidamente, especialmente quando o efeito da geometria leva a um aumento do acoplamento térmico do feixe incidente.

O *keyhole* formado em condições estáticas possui uma geometria similar à geometria apresentada na furação a laser. Esta geometria é uma função complexa das condições de focalização do feixe, propriedades do material e duração. O *keyhole* formado pelo feixe laser possui um diâmetro maior próximo a superfície e vai se estreitando através da profundidade.

Este formato cônico é um enclausuramento eficiente para o feixe laser. Quando o feixe permanece enclausurado, reflete muitas vezes nas paredes, enquanto este existir dentro do *keyhole*. Cada vez que o laser reflete uma fração da energia é absorvida, contribuindo para adição de energia ao sistema.

Além deste fato, desde que as paredes do *keyhole* sejam cônicas, a energia absorvida pelas paredes é substancialmente menor que a absorvida no centro do feixe e decai com o tempo até que atinge um limite inferior ao limiar, para uma evaporação rápida.

A relação entre a velocidade da frente fundida e a formação do *keyhole* é uma medição aproximada da extensão da fusão lateral em direção ao aprofundamento do *keyhole* durante tempos curtos, t , depois do início da formação do *keyhole*. Depois de um determinado tempo Δt , o *keyhole* é cercado por uma camada líquida com volume que é comparável ao do *keyhole*. Neste momento, instabilidades na interface líquida do *keyhole* começam a dominar as interações.

1.2 Tipos de Laser

1.2.1 Laser de Nd:YAG

O laser de Nd:YAG é um laser de estado sólido, que tem como meio laser ativo a matriz hospedeira de cristal de YAG (*yttrium aluminium garnet*) dopada com íons Nd^{3+} . Este íon é o responsável pela emissão laser cujo comprimento de onda, é de 1.064 nm. Esta emissão é adequada para a

transmissão por fibra óptica, o que permite sua utilização em robôs e sistemas remotos. Assim, a fonte de alimentação e o sistema de geração de laser podem estar bem longe das unidades de soldagem, o que pode ser uma vantagem em diversos sistemas operacionais. Outra vantagem do uso de fibra óptica vem da injeção do feixe de laser em uma fibra óptica, que torna o modo espacial mais *top hat* permitindo uma distribuição mais uniforme da intensidade espacial. A radiação no infravermelho próximo deste laser é absorvida por uma variedade mais extensa de metais se comparado com os lasers de CO₂ o que torna este tipo de laser especialmente adequado para a soldagem de metais altamente refletivos.

Os sistemas de laser de Nd:YAG bombeados por semicondutores variam 1 até 4,5 kW de potência contínua e na indústria desempenham um papel importante na soldagem de seções finas a moderadas, especialmente quando o fornecimento de energia é realizado através de fibras ópticas, devido à complexidade da manipulação do feixe de laser. Sob estas condições, peças de aço carbono com espessura de 6 a 8 mm de espessura podem ser soldadas.

Uma outra característica deste tipo de laser, é a possibilidade de se obterem elevadas energias por pulso quando operado no modo pulsado. Pulsos de energia de mais de 100 J e larguras temporais controladas a partir de alguns microssegundos até dezenas de milissegundos permitem uma extrema versatilidade em aplicações na soldagem por penetração. A principal desvantagem deste tipo de laser é baixa potência média, o que limita a taxa de repetição e reduz a velocidade do processo. As principais aplicações são em casos em que haja uma necessidade de reduzir a zona termicamente afetada (ZTA), como no caso da fabricação de marca-passos cardíacos, soldagem de chapas finas, bem como na soldagem de componentes eletrônicos e equipamentos médicos.

1.2.2 Laser de Fibra

O meio laser ativo é uma fibra óptica dopada com íons de terras raras, geralmente de Itérbio, com uma radiação emitida muito próxima ao de neodímio (de 1.030 até 1.070 nm). Os sistemas modernos têm alto brilho e potência do laser

acima de 10 kW, permitindo soldas com razão de aspecto extremamente elevadas em materiais muito espessos e com velocidades de soldagem com muitos metros por minuto [17]. O cordão de solda resultante é muito estreito e tem uma geometria quase paralela em toda a seção da poça de fusão.

A alta qualidade de feixe com muito baixa divergência também permite sua focalização em diâmetros muito pequenos para distâncias de trabalho muito longas. Por exemplo, um laser com 1 kW pode ser focalizado em um ponto de 50 μm de diâmetro com uma lente de distância focal de 100 mm. Com esta configuração, é possível soldar chapas muito finas (espessuras inferiores a 0,1 mm) sem distorções e com velocidades de dezenas de metros por minuto [18].

O desenvolvimento tecnológico destes sistemas ainda não atingiu todo seu potencial e até mesmo lasers mais potentes estão previstos num futuro próximo.

1.3 Materiais

1.3.1 Monel 400

Em janeiro de 1906, Ambrose Monell, presidente da International Nickel Company (Inco) patenteou o processo de refino para produção de uma liga níquel/cobre e batizou a liga com o nome de sua família.

Em comparação com o aço, o Monel é de difícil usinabilidade, sendo necessário usina-lo em velocidades de corte e avanços baixos, pois do contrário pode ser endurecido muito rapidamente. É resistente à corrosão e a ação de ácidos, e algumas de suas ligas podem resistir a um incêndio em oxigênio puro. É comumente utilizado em aplicações onde os ambientes são altamente corrosivos. Pequenas adições de alumínio e titânio formam uma liga (K-500) com a mesma resistência à corrosão, mas com uma resistência mecânica maior.

O Monel 400 apresenta alta resistência à corrosão e oxidação, aliada à elevada resistência mecânica e boa ductilidade, tornando-se um material adequado para ser conformado a frio. Essas características fazem do Monel 400 uma liga mais atraente do que os metais puros para uma grande faixa de

aplicações. Nas indústrias químicas o Monel 400 é muito utilizado na fabricação de vasos, tubulações, filtros e válvulas, o que implica em processos de conformação mecânica e soldagem [19].

O Monel 400 é uma solução sólida binária de níquel e cobre. Como níquel e o cobre são mutualmente solúveis em todas as proporções, esta é uma liga com apenas uma fase e possui uma estrutura cristalina cúbica de fase centrada.

A **Tabela 1** mostra os limites químicos para que a liga seja considerada Monel 400. A **Tabela 2** mostra algumas características relevantes para o processo de soldagem da liga Monel 400.

Tabela 1: limitação química da composição de Monel 400 (%).

Elemento	%
Ni	63,0 (min.)
C	0,3 (max.)
Mn	2,0 (max.)
Fe	2,5 (max.)
S	0,024 (max.)
Si	0,5 (max.)
Cu	24,0 – 34,0

Tabela 2: características da liga de Monel 400.

Propriedade	Valor
Densidade	8,83 g/cm ³
Condutividade Térmica	21,8 W/(m·°C)
Ponto de Fusão	1.360 °C
Calor Específico	427 J/(kg·°C)
Limite de Resistência a Tração	482 até 586 MPa
Dureza	130 até 200 Vickers

1.3.2 Tântalo

O tântalo foi descoberto em 1802 por Anders Gustaf Ekeberg (Universidade de Uppsala, Suécia) a partir de minérios extraídos de pegmatitos em Ytterby, na Suécia e Kimoto, na Finlândia.

O tântalo é escuro (cinza-azulado), denso, dúctil, muito duro, facilmente fabricado, e altamente condutor de calor e eletricidade. O metal é conhecido por sua resistência à corrosão por ácidos. Somente é atacado pelo ácido fluorídrico, ácidos que contêm o íon fluoreto ou mediante fusão alcalina. O elemento tem um ponto de fusão apenas menor que o do tungstênio e o do rênio. O tântalo tem aplicações eletrônicas, óticas, mecânicas e na área medicinal [20]. A **Tabela 3** mostra algumas características relevantes para o processo de soldagem das ligas Tântalo.

O tântalo é muito utilizado em aplicações que requerem alta resistência a corrosão. Embora o tântalo não seja um dos metais nobres, ele pode ser comparado a eles em termos de resistência química. Além disso, o tântalo pode ser trabalhado de formas simples à temperatura ambiente, mesmo sua estrutura cristalina sendo cubica de corpo centrado.

Tabela 3: características da liga de Tântalo.

Propriedade	Valor
Densidade	16,65 g/cm ³
Condutividade Térmica	57,5 W/(m·°C)
Ponto de Fusão	2.996 °C
Calor Específico	140 J/(kg·°C)
Limite de Resistência a Tração	172 até 285 MPa
Dureza	89 até 122 Vickers

2. OBJETIVO

Neste projeto, o interesse é o de desenvolver a tecnologia de microsoldagem a laser para peças metálicas para aplicações industriais. O objetivo geral é obter um conjunto de conhecimento técnico-científico sobre o processo de soldagem de chapas finas de ligas metálicas avançadas visando futuras aplicações em diversos setores como indústrias nucleares, químicas, aeroespaciais e petrolíferas.

Os objetivos específicos são:

- Obter o conhecimento básico da metalurgia e da soldabilidade dos materiais avançados Monel 400 e Tântalo em forma de chapas finas com uso de lasers.
- Otimizar o processo de soldagem com laser pulsado e com laser contínuo e comparar a eficiência destes processos.
- Determinar as propriedades mecânicas e químicas das chapas processadas visando à aplicação em blindagem e encapsulamento de sistemas eletrônicos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Equipamentos

As soldagens com laser pulsado foram realizadas no Centro de Processamento de Materiais a Laser (CPML) que está no Centro de Lasers e Aplicações (CLA) do IPEN. Este equipamento possui um sistema de movimentação de 3 eixos controlado por um CNC, que está integrado à um sistema de geração de um feixe laser a partir de um cristal de Nd:YAG, que pode ser bombeado por uma lâmpada de criptônio ou de xenônio. Este feixe é conduzido por espelhos até o material a ser soldado e opera em modo pulsado.

O laser a fibra utilizado neste trabalho está instalado no Laboratório Multiusuário de Desenvolvimento e aplicações de Lasers e Óptica (DedALO), do Instituto de Estudos Avançados (IEAv/CTA). O laser é produzido numa fibra óptica de vidro dopada com Itérbio, com comprimento de onda de 1080 nm. Trata-se de um laser de 2 kW de potência média (IPG, Modelo YLR-2000) dotado de uma fibra de saída com 50 μm de diâmetro e 5 m de extensão. Uma unidade de acoplamento de fibras faz a conexão de uma segunda fibra com 100 μm de diâmetro e 10 m de comprimento que será utilizada nos processos de refusão. A fibra secundária é conectada a um colimador óptico formando o sistema de acoplamento do feixe. Este laser está inserido numa cabine de processamento em alumínio equipada com sistemas de gases auxiliares de processo e de exaustão de fumos.

Os dois equipamentos possuem um sistema de focalização muito semelhante, cuja representação esquemática é demonstrada na **Figura 4**.

Figura 4: diagrama esquemático dos sistemas de soldagem por laser e da posição utilizada para realização da soldagem.

3.2 Análise da Composição Química dos Materiais

Nas **Tabelas 4 e 5** são mostrados os resultados obtidos da análise por fluorescência de raios X realizado no Centro de Química e Meio Ambiente (CQMA) do IPEN para a obtenção da composição química dos dois materiais de base.

Tabela 4: composição química do Monel 400 (% em peso).

Elemento	Ni	Cu	Fe	Mn	Al	Si	S
%	73 ± 1	24 ± 1	2,1 ± 0,5	1,4 ± 0,5	0,21 ± 0,05	0,16 ± 0,05	< 0,03

Tabela 5: composição química do Tântalo (% em peso).

Elemento	Ta	Fe
%	99,9 ± 0,1	0,04 ± 0,02

Para os ensaios, foram utilizadas chapas de Monel 400 e de Tântalo com 100 µm de espessura e cortadas nas medidas de 100 x 50 mm.

3.3 Testes Preliminares

Inicialmente foram realizados testes preliminares de soldagem com ambos os materiais no laser pulsado para obtenção de uma estimativa dos intervalos de intensidade que poderiam ser aplicadas a cada material. Estes testes preliminares têm como objetivo prover um arcabouço sobre a termodinâmica na soldagem destes materiais nestas espessuras, pois uma intensidade excessiva gera perda ou degradação do material e uma intensidade insuficiente pode gerar falta de penetração.

Nas soldagens preliminares dos dois materiais foram utilizadas condições de soldagem com energias entre 2 e 4 J, duração de pulso entre 4 e 8 ms e diâmetro do feixe incidente entre 124 e 219 µm. A velocidade de soldagem para estes testes foi fixada em 170 mm/min. A taxa de repetição foi fixada em 8 Hz. Com estas condições foi obtido um intervalo de intensidades de 3,32 e 72,5 KW/mm².

Após a soldagem, os cordões foram analisados por microscopia eletrônica de varredura e ensaios de microdureza. O intervalo de intensidades para o Monel 400 ficou entre 14,2 e 20,4 KW/mm² e para o tântalo ficou entre 24,2 e 35,7 KW/mm². Abaixo destes intervalos, as soldagens não apresentaram união e acima apresentavam soldagem com alta perda de material ou degradação do material. Já era esperado que o intervalo de intensidade para o tântalo fosse maior que a do Monel 400, pois há uma grande diferença entre a temperatura de fusão e a condutividade térmica dos dois materiais.

3.4 Desenvolvimento das Soldagens

Para a soldagem pulsada, a velocidade de deslocamento do feixe laser e a taxa de repetição foram fixadas em 170 mm/min e 8 Hz, respectivamente; o diâmetro do feixe incidente foi calculado conforme explicado a seguir e fixado em 219 µm para o Monel 400 e 180 µm para o tântalo; para estas condições de soldagem a sobreposição de pulsos ficaram por volta 40%. Os parâmetros energia e duração do pulso foram variados para realização do estudo.

Para a soldagem contínua do Monel 400 e do Tântalo a potência foi variada para realização do estudo. A velocidade de soldagem para o Monel 400 foi fixada em 150 mm/s, que é o limite máximo do equipamento; para o Tântalo a velocidade foi variada. O diâmetro do feixe incidente sobre o material foi fixado em 0,1 mm para o Tântalo e foi variado para o Monel 400.

Todos os cordões de solda foram realizados com o mesmo ângulo de soldagem: 90°. Para estes estudos as soldagens foram realizadas em juntas sobrepostas. As amostras foram soldadas em uma atmosfera de argônio a uma vazão de 12 l/min. Foi utilizado gás de proteção na raiz da solda somente para a soldagem pulsada. Na soldagem com laser de fibra, não foi utilizado proteção de raiz, pois não havia um sistema de proteção de gás que acompanhasse a região de soldagem em altas velocidades.

Parâmetros do laser, tais como, energia do pulso ou potência, largura temporal, taxa de repetição e velocidade são regulados diretamente no equipamento antes da soldagem. Outras variáveis são dependentes das condições do experimento. Por exemplo, a intensidade do feixe laser na soldagem pode ser variada através da combinação da energia do pulso, da duração do pulso e da área irradiada pelo feixe, conforme **Equação (7)**:

$$I = \frac{E}{a.t_p} \qquad \text{Equação (7)}$$

Onde E é a energia do pulso, a é a área do diâmetro do feixe incidente e t_p é a duração do pulso laser.

A área por sua vez, é variada pela modificação do diâmetro do feixe laser incidente sobre a superfície da chapa, e esta variação é feita tirando-se a superfície da chapa do foco do laser. O diâmetro no ponto focal d_{min} de um feixe laser com diâmetro inicial d_0 , fator de qualidade M^2 , comprimento de onda λ e focalizado por uma lente de comprimento focal f é dado pela **Equação (8)** [21]:

$$d_{min} = \frac{4.M^2.\lambda.f}{\pi.d_0} \quad \text{Equação (8)}$$

A variação deste diâmetro em relação à posição do ponto focal Z é dada pela **Equação (9)** [22]:

$$\omega = \omega_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{M^2.\lambda.Z}{\pi.\omega_0^2} \right)^2} \quad \text{Equação (9)}$$

Onde ω e ω_0 são respectivamente, o raio do feixe na posição Z e no foco, onde $d_{min} = 2\omega$.

Podemos ver nas **Tabelas 6 e 7** as condições de soldagem que foram utilizadas na soldagem pulsada de tântalo e Monel 400. A intensidade I é dada pela **Equação (1)**.

Tabela 6: condições utilizadas na soldagem de Monel 400 com laser pulsado.

	Amostra de Monel 400	01	02	03	04	05	06
Parâmetro							
Energia por pulso (J)		4	4,5	5	4	4,5	5
Duração do Pulso (ms)		7,5	7,5	7,5	7	7	7
Intensidade (KW/ mm²)		14,2	15,9	17,7	15,2	17,1	19,0
Aporte Térmico Médio (J/mm)		12	13,5	15	12	13,5	15

Tabela 7: condições utilizadas na soldagem de Tântalo com laser pulsado.

	Amostra de Tântalo	01	02	03	04	05	06
Parâmetro							
E - Energia por pulso (J)		4	4,5	5	4	4,5	5
t_p - Duração do Pulso (ms)		6,5	6,5	6,5	6	6	6
I - Intensidade (KW/ mm ²)		24,2	27,2	30,2	26,2	29,5	32,8
AT_m - Aporte Térmico Médio (J/mm)		12	13,5	15	12	13,5	15

Para calcular o aporte térmico médio é necessário saber quantos pulsos são feitos em uma determinada unidade de medida linear. Com a frequência de 8 Hz e velocidade de soldagem em 170 mm/min (2,83 mm/s), obtém-se aproximadamente 3 pulsos a cada milímetro. Desta forma multiplicamos a energia do pulso pelo número de pulsos em um milímetro. Pela **Equação (10)** é possível obtermos o aporte térmico médio AT_m , para uma energia E , uma frequência h e uma velocidade v :

$$AT_m = \frac{E \cdot h}{v} \quad \text{Equação (10)}$$

As **Tabelas 8 e 9** nos mostram as condições de soldagem que foram utilizadas para realização da soldagem contínua. Também é possível observar que nesta tabela temos o parâmetro “potência” substituindo os parâmetros “energia do pulso” e “duração do pulso”; este fato ocorre em razão das características do equipamento.

Tabela 8: condições utilizadas na soldagem de Monel 400 com laser contínuo.

	Amostra de Monel 400	01	02	03	04	05	06
Parâmetro							
Potência (W)		435	342	295	220	435	500
Velocidade (mm/s)		150	150	150	150	150	150
Diâmetro do Feixe (µm)		100	100	100	100	1640	1640
Intensidade (KW/ mm²)		27,7	21,8	18,8	14,0	0,103	0,118
Aporte Térmico (J/mm)		2,9	2,28	1,97	1,47	2,9	3,33

Tabela 9: condições utilizadas na soldagem de Tântalo com laser contínuo.

	Amostra de Tântalo	01	02	03	04	05	06
Parâmetro							
Potência (W)		295	342	435	500	435	435
Velocidade (mm/s)		150	150	150	150	100	50
Diâmetro do Feixe (µm)		100	100	100	100	100	100
Intensidade (KW/ mm²)		18,8	21,8	27,7	31,8	27,7	27,7
Aporte Térmico (J/mm)		1,97	2,28	2,9	3,33	4,35	8,7

Na soldagem contínua podemos calcular o aporte térmico AT , utilizando a velocidade v e a potência P pela **Equação (5)**:

$$AT = \frac{P}{v} \quad \text{Equação (5)}$$

Na soldagem de chapas finas é extremamente importante a utilização de um dispositivo que fixe as chapas na posição de soldagem.

As amostras foram soldadas em junta sobreposta e foi utilizado um dispositivo para garantir a fixação, evitar falta de contato entre as chapas e distorções excessivas. A disposição das chapas no dispositivo pode ser vista na **Figura 5**.

Figura 5: sistema de fixação com indicação dos componentes.

Antes da soldagem, o material foi cortado no formato de 100 x 50 mm e limpo com álcool isopropílico para garantir que as amostras apresentassem a mesma condição de superfície e tivessem um resultado homogêneo.

Após a soldagem, nenhuma das amostras foi submetida a tratamento térmico ou processo de usinagem e foi realizada uma preparação metalográfica da secção transversal dos cordões de solda, e posterior revelação da estrutura através de ataque químico.

Os resultados experimentais foram analisados com base na relação entre combinação de parâmetros de cada junta soldada e a geometria dos cordões de solda, a dureza na zona fundida (ZF) e no material de base (MB), análise da microestrutura gerada na região da ZF a resistência à corrosão de meios comuns nas indústrias petrolífera, química e naval.

A análise da microestrutura e a medição dos cordões de solda foram realizadas em um microscópio ótico com um sistema de análise de imagens que está localizado Centro de Tecnologia SENAI Solda (CTS Solda). As condições que apresentaram melhores resultados na análise por microscopia ótica e nos ensaios de microdureza foram submetidas a ensaios de tração e ensaio de corrosão.

Foram realizados ensaios de microdureza Vickers com carga de 0,2 Kg. As medidas de microdureza foram realizadas na secção transversal da junta soldada, numa direção paralela à superfície da chapa, próximo à linha de conexão. Este ensaio foi realizado em um microdurômetro semi-automático. Os ensaios de microdureza e a análise por microscopia ótica foram realizados no CTS Solda.

Os ensaios de tração foram realizados em um equipamento localizado no Instituto de Estudos Avançados (IEAv) do Departamento de Ciência e Tecnologia da Aeronáutica (DCTA).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Monel 400

4.1.1 Análise por Microscopia Ótica

Nas **Figuras 6 a 11** são apresentados os resultados das micrografias da secção transversal das juntas soldadas de Monel 400 com laser pulsado. Observa-se que todos os cordões apresentaram penetração total e a largura dos cordões de solda aumenta com o aumento da intensidade aplicada na respectiva soldagem. A preparação metalográfica foi realizada com um ataque químico utilizando-se uma solução química composta por 50% HNO_3 (concentrado) e 50% de ácido acético (glacial). A solução foi utilizada logo após o preparo.

Figura 6: secção transversal do cordão de solda da amostra 01 de Monel 400 soldado com laser pulsado. Aporte térmico médio: 12,0 J/mm; Intensidade: 14,2 KW/ mm².

Figura 7: secção transversal do cordão de solda da amostra 02 de Monel 400 soldado com laser pulsado. Aporte térmico médio: 13,5 J/mm; Intensidade: 15,9 KW/ mm².

Figura 8: secção transversal do cordão de solda da amostra 03 de Monel 400 soldado com laser pulsado. Aporte térmico médio: 15,0 J/mm; Intensidade: 17,7 KW/ mm².

Figura 9: secção transversal do cordão de solda da amostra 04 de Monel 400 soldado com laser pulsado. Aporte térmico médio: 12,0 J/mm; Intensidade: 15,2 KW/ mm².

Figura 10: secção transversal do cordão de solda da amostra 05 de Monel 400 soldado com laser pulsado. Aporte térmico médio: 13,5 J/mm; Intensidade: 17,1 KW/ mm².

Figura 11: secção transversal do cordão de solda da amostra 06 de Monel 400 soldado com laser pulsado. Aporte térmico médio: 15,0 J/mm; Intensidade: 19,0 KW/ mm².

Nas **Figuras 12 a 17** são apresentados os resultados das micrografias da secção transversal das juntas soldadas de Monel 400 com laser contínuo. Observa-se que os cordões das amostras 01,02 e 03 apresentaram penetração total reforço tanto na superfície como na raiz do cordão de solda. As amostras 04, 05 e 06 apresentaram penetração parcial.

Figura 12: secção transversal do cordão de solda da amostra 01 de Monel 400 soldado com laser contínuo. Aporte térmico: 2,9 J/mm; Intensidade: 27,7 KW/mm².

Figura 13: secção transversal do cordão de solda da amostra 02 de Monel 400 soldado com laser contínuo. Aporte térmico: 2,28 J/mm; Intensidade: 21,8 KW/mm².

Figura 14: secção transversal do cordão de solda da amostra 03 de Monel 400 soldado com laser contínuo. Aporte térmico: 1,97 J/mm; Intensidade: 18,8 KW/mm².

Figura 15: secção transversal do cordão de solda da amostra 04 de Monel 400 soldado com laser contínuo. Aporte térmico: 1,47 J/mm; Intensidade: 14,0 KW/mm².

Figura 16: secção transversal do cordão de solda da amostra 05 de Monel 400 soldado com laser contínuo. Aporte térmico: 2,9 J/mm; Intensidade: 0,103 KW/mm².

Figura 17: secção transversal do cordão de solda da amostra 06 de Monel 400 soldado com laser contínuo. Aporte térmico: 3,33 J/mm; Intensidade: 0,118 KW/mm².

A soldagem com laser contínuo, embora tenha sido realizada com velocidade de soldagem 520% maior em comparação à soldagem com laser pulsado, apresenta cordões com largura menores que os cordões soldados com laser pulsado, como pode ser observado nas **Tabelas 10 e 11**, o que pode ter sido ocasionado pelo aporte térmico menor associado ao tempo de interação menor, ambos ocasionados pela alta velocidade.

Tabela 10: largura dos cordões de solda das amostras de Monel 400 soldadas com laser pulsado.

Amostra	1	2	3	4	5	6
Larg. na Superfície (μm)	700	781,25	906,25	687,5	793,75	900
Larg. na Raiz (μm)	312,5	500	593,25	412,5	587,5	775

Tabela 11: largura dos cordões de solda das amostras de Monel 400 soldadas com laser contínuo.

Amostra	1	2	3	4	5	6
Larg. na Superfície (μm)	500	437,5	387,5	300	481,25	-
Larg. na Raiz (μm)	450	325	281,25	-	-	-

Observam-se também reforços (saliência) nas superfícies e nas raízes das soldagens com laser contínuo. Este fato ocorre devido ao efeito de capilaridade, pois como a o volume onde é aplicada a energia é pequeno o material, quando liquido, apresenta pressão interna maior que a externa, o que ocasiona a contração o das chapas. Este reforço pode agir como concentrador de tensões quando a soldagem for solicitada a esforços mecânicos e ocasionar trincas e posterior rompimento do cordão de solda.

Como já eram esperados, os cordões soldados fora do intervalo de intensidades previamente estabelecido para cada material apresentaram falta de penetração. Estes casos só foram observados na soldagem com laser contínuo, onde as amostras 04, 05 e 06 apresentaram falta de penetração, devido a drásticas reduções de intensidade e aporte térmico presentes nestes cordões, propiciados pela diminuição da potência somada ao aumento da área irradiada pelo feixe. Na amostra 05 foi possível conduzir o calor a chapa inferior devido à aplicação de uma potência maior que a da amostra 04. Observa-se que na amostra 06, ocorreu provavelmente um problema operacional na fixação das chapas, o que ocasionou uma distorção excessiva e, associado ao aumento da potência, levou à degradação da chapa superior sem que houvesse união com a chapa inferior.

Mesmo com a utilização de um sistema de fixação para as soldagens, pode-se observar, tanto na soldagem com laser pulsado como na soldagem laser contínuo, um *gap* entre as chapas. Este *gap* atua como um isolador térmico na soldagem de chapas finas e esta característica afeta a soldagem com laser pulsado, tornando sua raiz da solda mais estreita que a superfície e na soldagem com laser contínuo, tornando o cordão mais estreito na interface entre as duas chapas.

Em ambas as soldagens a microestrutura apresentou um refinamento de grão na periferia do cordão de solda e, devido à dissipação de calor que ocorre do centro do cordão para a periferia, houve um crescimento dendrítico, o que levou a formação de grãos colunares.

4.1.2 Perfilometria Ótica

Foram realizadas análises por perfilometria ótica com o intuito de observar melhor o formato dos cordões de soldas obtidos no processamento das chapas de Monel 400.

As **Imagens 18 e 19** mostram os resultados obtidos para a superfície e para a raiz do cordão de solda, respectivamente, na soldagem do Monel 400 pelo processo pulsado.

Figura 18: perfil da superfície do cordão de solda da amostra 2 de Monel 400 soldada com laser pulsado.

Figura 19: perfil da raiz do cordão de solda da amostra 2 de Monel 400 soldada com laser pulsado.

Como foi indicado pela análise por microscopia ótica, cada ponto de soldagem apresenta uma pequena perda de material, tanto na superfície como na raiz do cordão. Este cordão apresenta uma perda de material de próximo 50 μm no centro do cordão se comparado com a superfície da chapa.

Através destas imagens pôde-se observar que levando-se em consideração a posição dos pulsos, foi obtido uma taxa sobreposição de aproximadamente 35%.

As **Imagens 20 e 21** mostram os resultados obtidos para a superfície e para a raiz do cordão de solda, respectivamente, na soldagem do Monel 400 pelo processo pulsado.

Figura 20: perfil da superfície do cordão de solda da amostra 3 de Monel 400 soldada com laser contínuo.

Figura 21: perfil da raiz do cordão de solda da amostra 3 de Monel 400 soldada com laser contínuo.

Como foi indicado pela análise por microscopia ótica, o cordão apresenta um aparente aumento do volume. Este fato se deve as forças de capilaridade que ocorrem na soldagem de laminas muito finas.

Em alguns pontos o cordão apresentou formato que diferenciavam do formato apresentado nas imagens acima. Este fato ocorreu, provavelmente, devido ao empenamento das chapas, o que altera o diâmetro incidente na peça e por consequência a dinâmica do material fundido.

4.1.3 Ensaios de Microdureza

Foram feitos dois pontos de dureza para cada região da soldagem, a média dos resultados obtidos do ensaio de microdureza para cada região podem ser analisados a partir das **Tabelas 12 e 13**, as medidas foram obtidas próximos da linha de união entre as chapas, ou seja, à aproximadamente 100 μm da superfície do cordão de solda.

Tabela 12: resultados de microdureza Vickers para soldagem pulsada do Monel 400.

Amostra	ZF	Interface (ZF/MB)	ZF + 0,5 mm (MB)
1	179	171	157
2	173	181	150
3	176	175	160
4	192	181	173
5	182	186	154
6	169	173	160

Tabela 13: resultados de microdureza Vickers para soldagem contínua do Monel 400.

Amostra	ZF	Interface (ZF/MB)	ZF + 0,5 mm (MB)
1	145	163	136
2	145	154	135
3	147	149	135
4	145	158	137
5	-	-	-
6	-	-	-

Como pode ser observado, tanto no processo de soldagem contínuo como no pulsado não houve grande alteração na dureza do material. Na região fundida e na interface houve aumento da dureza em relação ao material de base, porém sem exceder a dureza normalmente esperada.

A soldagem pulsada, devido ao aporte térmico mais alto, apresentou uma dureza maior após a soldagem, até mesmo na medição realizada na distância de 0,5 mm em relação a região fundida. Isto indica que o processo apresenta uma região afetada pelo calor maior que no processo contínuo.

No processo contínuo, devido à alta velocidade e ao menor aporte térmico aplicado, a interface apresentou maior dureza que a região fundida. Isto ocorre devido a taxa de resfriamento ser maior, a região onde ocorre o crescimento dendrítico, e por consequência a formação de grãos colunares, é maior que no processo pulsado.

4.1.4 Ensaios de Tração

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina Emic, modelo DL10000, com célula de 100 KN de capacidade. A velocidade de ensaio foi de 5 mm/min em temperatura ambiente (60% umidade relativa à 20°C).

Foram fabricados 8 corpos-de-prova (nomeados de “A” a “H”) para os ensaios de tração. Os corpos-de-prova para os ensaios de tração foram produzidos utilizando-se as condições de soldagem semelhantes da amostra 05 da soldagem pulsada e da amostra 02 da soldagem contínua. Os corpos de prova foram produzidos no formato padrão *sub-sized*. Também foram feitos corpos-de-prova sem soldagem para comparação dos resultados.

Devido à escassez de material só foi possível produzir um corpo-de-prova pelo processo de soldagem contínuo.

As **Imagens 22 a 37** mostram a região onde cada um dos corpos-de-prova rompeu e os respectivos gráficos tensão-deformação de cada uma das amostras. Como pode ser observado todos os corpos-de-prova soldados pelo processo pulsado romperam fora do cordão de solda. O corpo-de-prova produzido com soldagem contínua apresentou uma ruptura no cordão de soldagem.

Figura 22: região de ruptura da corpo-de-prova A de Monel 400. Corpo-de-prova sem soldagem.

Figura 23: gráfico tensão-deformação da corpo-de-prova A de Monel 400. Corpo-de-prova sem soldagem.

Figura 24: região de ruptura da corpo-de-prova B de Monel 400. Amostra. Corpo-de-prova produzido com soldagem pulsada.

Figura 25: gráfico tensão-deformação da corpo-de-prova B de Monel 400. Corpo-de-prova produzido com soldagem pulsada.

Figura 26: região de ruptura da corpo-de-prova C de Monel 400. Corpo-de-prova sem soldagem.

Figura 27: gráfico tensão-deformação da corpo-de-prova C de Monel 400. Corpo-de-prova sem soldagem.

Figura 28: região de ruptura da corpo-de-prova D de Monel 400. Corpo-de-prova produzido com soldagem pulsada.

Figura 29: gráfico tensão-deformação da corpo-de-prova D de Monel 400. Corpo-de-prova sem soldagem.

Figura 30: região de ruptura da corpo-de-prova E de Monel 400. Corpo-de-prova sem soldagem.

Figura 31: gráfico tensão-deformação da corpo-de-prova E de Monel 400. Corpo-de-prova sem soldagem.

Figura 32: região de ruptura da corpo-de-prova F de Monel 400. Corpo-de-prova produzido com soldagem pulsada.

Figura 33: gráfico tensão-deformação da corpo-de-prova F de Monel 400. Corpo-de-prova produzido com soldagem pulsada.

Figura 34: região de ruptura da corpo-de-prova G de Monel 400. Corpo-de-prova produzido com soldagem pulsada.

Figura 35: gráfico tensão-deformação da corpo-de-prova G de Monel 400. Corpo-de-prova produzido com soldagem pulsada.

Figura 36: região de ruptura da corpo-de-prova H de Monel 400. Corpo-de-prova produzido com soldagem contínua.

Figura 37: gráfico tensão-deformação da corpo-de-prova H de Monel 400. Corpo-de-prova produzido com soldagem contínua.

A **Tabela 14** mostra todos os resultados obtidos nos ensaios de tração para os corpos de prova do Monel 400. Excluindo-se o corpo-de-prova H, que apresentou claramente um cordão muito mais frágil. Pode-se observar que os corpos-de-prova romperam em média a 97% da resistência dos corpos-de-prova sem soldagem, o que, associado ao fato que todos os cordões romperam fora da região de soldagem, demonstra uma soldagem que resultou em um cordão com uma alta resistência.

Tabela 14: resultados dos ensaios de tração para soldagem do Monel 400.

Corpo de Prova	Tipo de Soldagem	Tensão Maxima (MPa)	Deformação (mm)
A	Sem soldagem	499	6,81
B	Soldagem pulsada	485	7,10
C	Sem soldagem	520	8,70
D	Soldagem pulsada	496	7,11
E	Sem soldagem	513	8,23
F	Soldagem pulsada	534	7,86
G	Soldagem pulsada	472	5,95
H	Soldagem contínua	72	0,40

4.1.5 Ensaios de Corrosão

A resistência à corrosão do Monel 400, após soldagem pelo processo pulsado, foi testada através de um ambiente que simulou um ambiente marítimo. A escolha desse ambiente se deu pelo fato de que esse material tem grande aplicação na extração de óleo e gás em poços marítimos [23].

A amostra foi depositada em um meio com de água com 30% em peso de NaCl, à temperatura de 40°C e o tempo de exposição foi de 30 dias. A avaliação foi feita por um método visual (presença de sítios de *pitting* e/ou outros indícios de corrosão) e por perda de massa.

As **Imagens 38 e 39** mostram, respectivamente, a macrografia dos materiais próximo da região do cordão, para soldagem contínua e pulsada. Pode-se observar a ausência de quaisquer sítios de *pitting* e/ou outros indícios de corrosão.

Figura 38: macrografia realizada próxima ao cordão de solda produzido pelo processo pulsado para verificação de possíveis indícios de corrosão do Monel 400.

Figura 39: macrografia realizada próxima ao cordão de solda produzido pelo processo contínuo para verificação de possíveis indícios de corrosão do Monel 400.

Não foram identificados sítios de corrosão e nem perda de massa. Baseado na análise realizada, pode-se concluir que o cordão de solda criado pela técnica de soldagem pulsada não afetou a, normalmente alta, resistência à corrosão do Monel 400.

4.2 Tântalo

4.2.1 Análise por Microscopia Ótica

Nas **Imagens 40 a 45** são apresentados os resultados das micrografias da secção transversal das juntas soldadas de Tântalo com laser pulsado. Observa-se que todos os cordões apresentaram união das chapas e provável penetração total. A preparação metalográfica não pode ser mostrado devido às dificuldades encontradas de se atacar o Tântalo puro (99,9%). Algumas soluções recomendadas pela literatura foram utilizadas, como as soluções ASTM 161 e ASTM 163, mas sem sucesso.

Figura 40: secção transversal do cordão de solda da amostra 01 de Tântalo soldado com laser pulsado. Aporte térmico médio: 12,0 J/mm; Intensidade: 24,2 KW/ mm².

Figura 41: secção transversal do cordão de solda da amostra 02 de Tântalo soldado com laser pulsado. Aporte térmico médio: 13,5 J/mm; Intensidade: 27,2 KW/ mm².

Figura 42: secção transversal do cordão de solda da amostra 03 de Tântalo soldado com laser pulsado. Aporte térmico médio: 15,0 J/mm; Intensidade: 30,2 KW/ mm².

Figura 43: secção transversal do cordão de solda da amostra 04 de Tântalo soldado com laser pulsado. Aporte térmico médio: 12,0 J/mm; Intensidade: 26,2 KW/ mm².

Figura 44: secção transversal do cordão de solda da amostra 05 de Tântalo soldado com laser pulsado. Aporte térmico médio: 13,5 J/mm; Intensidade: 29,5 KW/ mm².

Figura 45: secção transversal do cordão de solda da amostra 06 de Tântalo soldado com laser pulsado. Aporte térmico médio: 15,0 J/mm; Intensidade: 32,8 KW/ mm².

Nas **Imagens 46 a 48** são apresentados os resultados das micrografias da secção transversal das juntas soldadas de Tântalo com laser contínuo. Podemos observar que somente as combinações de parâmetros das amostras 03, 04 e 05 apresentaram união das chapas. As amostras 01, 02 e 06 não apresentaram união das chapas.

Figura 46: secção transversal do cordão de solda da amostra 03 de Tântalo soldado com laser contínuo. Aporte térmico: 2,9 J/mm; Intensidade: 27,7 KW/mm².

Figura 47: secção transversal do cordão de solda da amostra 04 de Tântalo soldado com laser contínuo. Aporte térmico: 3,33 J/mm; Intensidade: 31,8 KW/mm².

Figura 48: secção transversal do cordão de solda da amostra 05 de Tântalo soldado com laser contínuo. Aporte térmico: 4,35 J/mm; Intensidade: 27,7 KW/mm².

Observa-se que em ambos os processos as amostras de tântalo apresentaram alta perda de material tanto na superfície como na raiz da solda. Também é possível observar um maior *gap* entre as chapas, se compararmos com a soldagem do Monel 400. Este *gap* ocorre em decorrência de uma distorção excessiva que ocorreu durante estes processos de soldagem.

As **Tabelas 15 e 16** nos mostram as larguras dos cordões obtidos nas soldagens de Tântalo para ambos os processos.

Tabela 15: largura dos cordões de solda das amostras de Tântalo soldadas com laser pulsado.

Amostra	1	2	3	4	5	6
Larg. na Superfície (μm)	693,75	537,5	662,5	475	625	656,25
Larg. na Raiz (μm)	593,75	337,5	518,75	312,5	512,5	618,75

Tabela 16: largura dos cordões de solda das amostras de Tântalo soldadas com laser contínuo.

Amostra	1	2	3	4	5	6
Larg. na Superfície (μm)	-	-	318,75	406,25	437,5	-
Larg. na Raiz (μm)	-	-	200	368,75	425	-

A perda de material e a distorção ocorrem devido à condutividade térmica do tântalo ser baixa para um material que possui um ponto de fusão muito alto se comparado ao ponto de fusão do Monel 400. Esta característica do tântalo impede a propagação do calor pela chapa e tende a acumular calor na região onde o material está fundido, o que leva a perda de material por evaporação e a distorção excessiva da região onde está sendo aplicada a energia.

Na soldagem com laser pulsado observa-se que os cordões, embora apresentem provável penetração total e uma largura quase igual ao a da soldagem do Monel 400, apresentam uma soldagem com geometrias reduzidas, devido à perda de material.

Na soldagem com laser contínuo, observa-se que as amostra 01, 02 e 03 não apresentaram união das chapas, devido ao excessivamente baixo aporte térmico aplicado nestas soldagens. Com o aumento do aporte térmico, pode-se observar que a Amostra 04 apresentou união das chapas, porém este cordão apresenta grande fragilidade, devido à baixa largura e excessiva perda de material na superfície do cordão de solda.

As amostras 05 e 06 soldadas com laser contínuo apresentaram os melhores resultados para soldagem do tântalo, devido ao uso do aporte térmico 50% menor que as soldagens feitas com laser pulsado, que apresentaram perda excessiva de material, em associação com intensidades próximas ao limite

mínimo do intervalo de intensidades estabelecido para este estudo. Observa-se nas amostras 05 e 06 uma pequena depressão no centro das superfícies e das raízes dos cordões e possíveis pequenos reforços em torno dessas depressões, indicando que nestes casos o material se deslocou durante a soldagem e que a perda de material foi mínima. Os cordões também apresentaram larguras próximas às aprestandas pelos cordões soldados com laser pulsado.

4.2.2 Perfilometria Ótica

Foram realizadas análises por perfilometria ótica com o intuito de observar melhor o formato dos cordões de soldas obtidos no processamento das chapas de Monel 400.

As **Imagens 49 e 50** mostram os resultados obtidos para a superfície e para a raiz do cordão de solda, respectivamente, na soldagem do Tântalo pelo processo pulsado.

Figura 49: perfil da superfície do cordão de solda da amostra 2 de Tântalo soldada com laser pulsado.

Figura 50: perfil da raiz do cordão de solda da amostra 2 de Tântalo soldada com laser pulsado.

Como foi indicado pela análise por microscopia ótica, o cordão apresenta uma pequena perda de material na periferia do ponto de soldagem e um acúmulo de material no centro do cordão. Este acúmulo apresentou aproximadamente 19 µm de altura em relação a superfície da chapa.

A taxa sobreposição de pulsos para este cordão está em torno de 30%. Embora a velocidade de soldagem e a taxa de repetição para a soldagens pulsadas dos dois materiais sejam iguais, devido à baixa condutividade térmica do Tântalo, as soldagens do tântalo apresentaram cordões com menores pontos de soldagem, o que diminui a taxa sobreposição de pulsos.

As **Imagens 51 e 52** mostram os resultados obtidos para a superfície e para a raiz do cordão de solda, respectivamente, na soldagem do Tântalo pelo processo contínuo.

Figura 51: perfil da superfície do cordão de solda da amostra 5 de Tântalo soldada com laser contínuo.

Figura 52: perfil da raiz do cordão de solda da amostra 5 de Tântalo soldada com laser contínuo.

Na soldagem com contínua do Tântalo pode ser observado algumas regiões com uma depressão no centro do cordão em relação a superfície do cordão, tanto na superfície como na raiz da soldagem.

Nesta soldagem também é possível observar-se a aumento aparente do volume no cordão de solda, ocasionado pelas forças de capilaridade.

4.2.3 Ensaio de Microdureza

Foram feitos dois pontos de dureza para cada região da soldagem, a média dos resultados obtidos do ensaio de microdureza para cada região podem ser analisados a partir das **Tabelas 17 e 18**:

Tabela 17: resultados de microdureza Vickers para soldagem pulsada do Tântalo.

Amostra	ZF	Interface	ZF + 0,5 mm (MB)
1	222	233	106
2	226	235	115
3	417	310	135
4	251	237	126
5	483	215	129
6	339	292	120

Tabela 18: resultados de microdureza Vickers para soldagem contínua do Tântalo.

Amostra	ZF	Interface	ZF + 0,5 mm (MB)
1	-	-	-
2	-	-	-
3	276	153	119
4	276	131	96
5	356	290	119
6	-	-	-

As soldagens do Tântalo apresentaram um grande aumento em relação ao material de base. Isto pode ter ocorrido ao alto aporte térmico aplicado nos processos de soldagem.

A soldagem pulsada, apresentou mais uma vez, devido ao aporte térmico maior, uma região afetada pelo calor maior que a soldagem contínua.

Na soldagem contínua, a amostra 5 apresentou dureza maior que as amostras 3 e 4. Como pode ser observado nas soldagens do Tântalo, a dureza do material está intimamente ligada ao aporte térmico aplicado na soldagem.

4.2.4 Ensaio de Tração

Foram fabricados 8 corpos-de-prova (nomeados de “A” a “H”) para os ensaios de tração. Os corpos-de-prova para os ensaios de tração foram produzidos utilizando-se as condições de soldagem semelhantes da amostra 01 da soldagem pulsada e da amostra 03 da soldagem contínua. Os corpos de prova

foram produzidos no formato padrão *sub-sized*. Também foram feitos corpos-de-prova sem soldagem para comparação dos resultados.

Devido à escassez de material só foi possível produzir um corpo-de-prova pelo processo de soldagem contínuo.

As **Imagens 53 a 67** mostram a região onde cada um dos corpos-de-prova rompeu e os respectivos gráficos tensão-deformação de cada uma das amostras. Como pode ser observado as amostras B, H e G apresentaram ruptura no cordão da solda. As amostras D e F apresentaram ruptura fora do cordão de solda. A amostra C sofreu uma excessiva deformação durante o ensaio, por este motivo não apresentou nenhum resultado relevante.

Figura 53: região de ruptura da corpo-de-prova A de Tântalo. Corpo-de-prova sem soldagem.

Figura 54: gráfico tensão-deformação da corpo-de-prova A de Tântalo. Corpo-de-prova sem soldagem.

Figura 55: região de ruptura da corpo-de-prova B de Tântalo. Corpo-de-prova produzido com soldagem pulsada.

Figura 56: gráfico tensão-deformação da corpo-de-prova B de Tântalo. Corpo-de-prova produzido com soldagem pulsada.

Figura 57: região de ruptura da corpo-de-prova C de Tântalo. Corpo-de-prova sem soldagem.

Figura 58: gráfico tensão-deformação da corpo-de-prova C de Tântalo. Corpo-de-prova sem soldagem.

Figura 59: região de ruptura da corpo-de-prova D de Tântalo. Corpo-de-prova produzido com soldagem pulsada.

Figura 60: gráfico tensão-deformação da corpo-de-prova D de Tântalo. Corpo-de-prova produzido com soldagem pulsada.

Figura 61: região de ruptura da corpo-de-prova E de Tântalo. Corpo-de-prova produzido com soldagem pulsada.

Figura 62: gráfico tensão-deformação da corpo-de-prova E de Tântalo. Corpo-de-prova produzido com soldagem pulsada.

Figura 63: região de ruptura da corpo-de-prova F de Tântalo. Corpo-de-prova produzido com soldagem pulsada.

Figura 64: gráfico tensão-deformação da corpo-de-prova F de Tântalo. Corpo-de-prova produzido com soldagem pulsada.

Figura 65: região de ruptura da corpo-de-prova G de Tântalo. Corpo-de-prova produzido com soldagem pulsada.

Figura 66: gráfico tensão-deformação da corpo-de-prova G de Tântalo. Corpo-de-prova produzido com soldagem pulsada.

Figura 67: região de ruptura da corpo-de-prova H de Tântalo. Corpo-de-prova produzido com soldagem contínua.

A **Tabela 19** mostra todos os resultados obtidos nos ensaios de tração para os corpos de prova do Tântalo.

Tabela 19: resultados dos ensaios de tração para soldagem do Tântalo.

Corpo de Prova	Tipo de Soldagem	Tensão Máxima (MPa)	Deformação (mm)
A	Sem Soldagem	127	3,36
B	Soldagem Pulsada	76	0,19
C	Sem Soldagem	65	1,90
D	Soldagem Pulsada	231	6,62
E	Sem Soldagem	224	5,32
F	Soldagem Pulsada	213	4,81
G	Soldagem Pulsada	210	0,17
H	Soldagem Contínua	188	6,15

Excetuando-se os corpos-de-prova B, que rompeu na soldagem e C, que se deformou durante o ensaio de tração, pode-se observar que os corpos-de-prova soldados apresentaram em média ruptura 21% acima da média da tensão máxima dos corpos-de-prova sem soldagem. O corpo-de-prova G rompeu no cordão de solda, porém apresentou uma soldagem resistente, onde a tensão máxima foi 17% acima da média da tensão máxima dos corpos-de-prova sem soldagem.

O corpo-de-prova H, o único soldado pelo processo contínuo, apresentou uma resistência coerente para o material. Devido a um problema no software de geração de gráficos, não foi gerado gráfico de resistência para este ensaio.

4.2.5 Ensaio de Corrosão

A resistência à corrosão do Tântalo, após soldagem pelos processos pulsado e contínuo, foi testada através de um ambiente que simulou um ambiente semelhante ao petróleo. A escolha desse ambiente se deu pelo fato de que esse material tem grande aplicação na extração de óleo e gás em poços marítimos. As condições do ensaios foram baseadas na norma ASTM G48.

A amostra foi depositada em um meio com de água com 6% em peso de FeCl_3 , à temperatura ambiente e o tempo de exposição foi de 24 horas. A

avaliação foi feita por um método visual (presença de sítios de *pitting* e/ou outros indícios de corrosão) e por perda de massa.

As **Imagens 68 e 69** mostram, respectivamente, a macrografia dos materiais próximo da região do cordão, para soldagem contínua e pulsada. Pode-se observar a ausência de quaisquer sítios de *pitting* e/ou outros indícios de corrosão.

Figura 68: macrografia realizada próxima ao cordão de solda produzido pelo processo pulsado para verificação de possíveis indícios de corrosão no Tântalo.

Figura 69: macrografia realizada próxima ao cordão de solda produzido pelo processo contínuo para verificação de possíveis indícios de corrosão no Tântalo.

Não foram identificados sítios de corrosão e nem perda de massa. Baseado na análise realizada, pode-se concluir que o cordão de solda criado pela técnica de soldagem pulsada não afetou a, normalmente alta, resistência à corrosão do Tântalo.

5. CONCLUSÕES

Como já havia sido observado em outros estudos a soldagem a laser de chapas com espessura de 100 μm é possível e muitas vezes oferece mais vantagens do que outros processos convencionais, devido às suas características como alta intensidade e baixo aporte térmico. Foi observada uma altíssima sensibilidade da geometria do cordão de solda à presença e ao tamanho do gap entre as chapas, o que já havia sido observado por Kawahito et al. [24], quando seus estudos indicam que quanto maior o *gap* entre os elementos a ser soldado, maior será a concavidade na superfície do cordão de solda, desde que o metal líquido tenha tempo suficiente para preencher a região do gap, fato que ocorreu com essas amostras. Isto se deve ao fato de que os *gaps* entre as chapas podem atuar como um concentrador de tensões na região da linha de conexão.

A soldagem dos materiais com laser pulsado apresentou cordões mais largos que os apresentados pela soldagem com laser contínuo, devido à baixa velocidade que o processo necessita, o que leva a um alto aporte térmico médio. Este fato melhorou a geometria do cordão, o que levou a um aumento da resistência do cordão de solda, o que é uma boa característica caso o cordão seja solicitado por esforços mecânicos. A soldagem dos materiais com laser contínuo apresentou cordões com reforços superficiais e na raiz da solda. Estes reforços, em determinadas aplicações, onde a junta sofre esforços mecânicos pode atuar como um concentrador de tensões, o que pode gerar e propagar trincas e a posterior ruptura do cordão de solda.

Na soldagem do Tântalo, devido ao alto ponto de fusão do material associado com sua baixa condutividade térmica, os cordões apresentaram geometrias menores, devido à perda de material e a distorção excessiva.

A soldagem do Monel 400 apresentou uma geometria maior tanto na soldagem pulsada quanto na soldagem contínua. A microestrutura com refinamento de grão no centro do cordão e, devido à dissipação de calor que ocorre do centro do cordão para a periferia, houve um crescimento dendrítico, o que levou a formação de grãos colunares.

A soldagem contínua apresentou uma velocidade de soldagem 520% maior que a soldagem pulsada, o que torna a soldagem contínua mais aplicável à linha de produção, porém o processamento de chapas finas requer um controle de energia mais preciso e laser pulsado é preferido para aplicações onde é necessário melhor controle de energia [6] [12] [25] [26].

Devido à necessidade de um controle preciso sobre a intensidade aplicada no processo de soldagem de chapas finas, a soldagem com laser pulsado apresentou maior aplicabilidade ao Monel 400, pois apresenta melhores características mecânicas.

A soldagem de chapas finas tântalo apresentou melhores resultados no laser contínuo. Porém os ensaios realizados indicam que para a execução de uma boa soldagem destes materiais e espessura, devido a suas características térmicas e físicas, é necessário um controle muito preciso não somente da intensidade, mas também do aporte térmico.

Os ensaios demonstraram que os dois processos podem ser aplicados para fabricação de componentes miniaturizados, porém para componentes que necessitem de um controle de aplicações de energia muito preciso, o processo pulsado se mostrou muito mais efetivo.

5.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

Com base nos resultados adquiridos neste trabalho, os seguintes temas são sugeridos:

- Desenvolvimento das aplicações de chapas finas de Tântalo e Monel para a indústria de óleo e gás e outros setores industriais;
- Estudos metalúrgicos mais aprofundados para soldagem de chapas finas de materiais avançados, como Tântalo e Monel;
- Estudos comparativos entre soldagens a laser pulsado e contínuo para outros materiais;
- Soldagem de chapas finas em base espessa, com o intuito de dar continuidade no desenvolvimento de encapsulamento de sensores;

- Soldagem de chapas finas com cordões em geometrias diferentes de cordões retos, por exemplo, cordões com formato circular.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TRIMMER, William SN. Microrobots and micromechanical systems. **Sensors and actuators**, v. 19, n. 3, p. 267-287, 1989.
- [2] LIMA, M. S. F. **Lasers in Materials Processing In: Lasers in Chemistry**. Ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2008, v.2, p. 1195-1212.
- [3] VENTRELLA, V. A.; BERRETTA, J. R.; DE ROSSI, W. Pulsed Nd:YAG Laser Welding of Ni-Alloy Hastelloy C-276 Foils. **Physics Procedia**, v. 39, p. 569-576, 2012.
- [4] VENTRELLA, V. A.; BERRETTA, J. R.; DE ROSSI, W. Micro Welding of Ni-based Alloy Monel 400 Thin Foil by Pulsed Nd:YAG laser. **Physics Procedia**, v. 12, p. 350-357, 2011.
- [5] VENTRELLA, V. A.; BERRETTA, J. R.; DE ROSSI, W. Pulsed Nd:YAG laser seam welding of AISI 316L stainless steel thin foils. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, p. 1838-1843, 2010.
- [6] DAS NEVES, M. D. M.; LOTTO, A.; BERRETTA, J. R.; DE ROSSI, W.; JUNIOR, N. Microstructure development in Nd:YAG laser welding of AISI 304 and Inconel 600. **Welding International**, v. 24, p. 739-748, 2010.
- [7] GILLNER, A.; HOLTKAMP, J.; HARTMANN, C.; OLOWINSKY, A.; GEDICKE, J.; KLAGES, K.; BOSSE, L.; BAYER, A. Laser Applications in Microtechnology. **Journal of Materials Processing Technology**, 167, p. 494-498, 2005.
- [8] ABE, N.; FUNADA, Y.; IMANADA, T.; TSUKAMOTO, M. Microwelding of Thin Stainless Steel Foil with a Direct Diode Laser. **Transaction of JWRI**, Vol. 34, p. 19-23, 2005.
- [9] Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2012-2015**. Secretaria Executiva, Distrito Federal, 2011.
- [10] BEYER, E.; DAUSINGER, F.; OSTENDORF, A.; OTTO, A. (eds.). **In Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing**, Munique, 13–16 de Junho, 2005
- [11] SCHMIDT, M.; ZAEH, M.F.; GRAF, T.; OSTENDORF, A. (eds.). **In Proceedings of the Sixth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing**, Munique, 23–26 de Junho, 2011
- [12] ION, J.C. **Laser Processing of Engineering Materials**. Reino Unido: Elsevier, 2005.

- [13] VILAR, R.; CONDE, O.; FAJARDO, M.; SILVA, L.O.; PIRES, M.; UTKIN, A. (eds.). ***XVII International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers***. Bellingham, 2009.
- [14] DULEY, W.W. ***Laser Welding***. Estados Unidos: Ed. John Wiley & Sons, p. 251, 1998.
- [15] SCHREIMPF, J. T. *Critical Review: Industrial Lasers and Applications. Proceedings of SPIE*, vol. 5706. SPIE: Bellingham, 2005.
- [16] MEUNIER, M.; HOLMES, A.S.; NINO, H.; BO, G. (eds.). *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing VII. Proceedings of SPIE*, vol. 7201. SPIE: Bellingham, 2009.
- [17] TOMÁNEK, P.; SENDERÁKOVÁ, D.; HRABOVSKÝ, M. (eds.). *Photonics, Devices, and Systems IV. Proceeding of SPIE*, vol. 7138. SPIE: Bellingham, 2008.
- [18] KRATKY, A.; SCHOUCKER, D.; LIEDL, G. (eds.). *Processing with kW fibre lasers: advantages and limits. In Proceedings of the XVII International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers. Proceeding of SPIE*, vol. 7131 SPIE: Bellingham, 2009.
- [19] SINGH,V.B.; GUPTA, A. The electrochemical corrosion and passivation behavior of Monel 400 in concentrated acids and their mixtures. ***Journal of Materials Science***, 2001, p. 1433-1442.
- [20] AGULYANSKY, A. ***The Chemistry of Tantalum and Niobium Fluoride Compounds***. Ed. Elsevier, 408 p., 2004.
- [21] JOHNSTON JR. M^2 Concept Characterizes Beam Quality. ***Laser Focus World***, p. 173-183, 1990.
- [22] HALL, D. ***The Physics and Technology of Laser Resonators***. Estados Unidos: Ed. Taylor & Francis, 1989.
- [23] SHERIF, E.M.; ALMAJID A. A.; BAIRAMOV, A. K.; AL-ZARHRANI, E. "Corrosion of Monel-400 in Aerated Stagnant Arabian Gulf Seawater after Different Exposure Intervals". ***International Journal of Electrochemical Science***, Vol. 6, 2011.
- [24] KAWAHITO, Y.; KITO, M.; KATAYAMA, S.; In-process Monitoring and Adaptive Control for gap in Micro butt Welding with Pulsed YAG Laser. ***Journal of Applied Physics***, v.40, p. 183-190, 2007.
- [25] TOLINSKI, M.; Lasers Seal the Deal in Medical. ***Manufacturing Engineering***, v. 140, p. 14-20, 2008.

[26] STEEN, W.M. ***Laser Material Processing***. Estados Unidos: Ed. Springer, p. 408, 2005.