

**DESEMPENHO DA SOLDA LASER EM DIFERENTES DIÂMETROS DE
ESTRUTURAS DE LIGA DE Ti-6Al-4V**

UBIRATAN GONÇALVES JÚNIOR¹, JOÃO PAULO LYRA E SILVA²; MORGANA
GUILHERME DE CASTRO³; CLEUDMAR AMARAL ARAÚJO⁴; MAURO ANTÔNIO
DE ARRUDA NÓBILO⁵, PAULO CEZAR SIMAMOTO JÚNIOR⁶.

1. Acadêmico do Curso de Odontologia da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia. Bolsista do Programa de Iniciação Científica CNPq 2010 SAU018 (Edital N° 07/2010 PIBIC/CNPq/UFU). junior_catalao@hotmail.com
2. Doutorando em Materiais Dentários da Faculdade de Odontologia de Piracicaba-UNICAMP.
3. Mestranda em Clínica Odontológica Integrada da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia.
4. Professor Doutor da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.
5. Professor Doutor titular da Faculdade de Odontologia de Piracicaba – UNICAMP.
6. Professor Doutor do Curso Técnico em Prótese Dentária da Escola Técnica de Saúde da Universidade Federal de Uberlândia. Avenida Amazonas, s/n°, Bloco 4K, Campus Umuarama, Uberlândia/MG-Brasil, CEP: 38400-902.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a resistência mecânica de liga de Ti-6Al-4V em diferentes diâmetros submetida ao processo de soldagem Laser, por meio de ensaio de resistência à tração. Foram confeccionados 25 corpos de prova (n=5) e divididos em 5 grupos: Grupo Controle com diâmetro de 3,0 mm, constituídos por barras intactas; Grupos L2.5; L3; L4 e L5 com 2.5, 3.0, 4.0 e 5.0 mm de diâmetros, respectivamente, soldados a Laser. As amostras foram submetidas ao ensaio de resistência à tração até a ruptura e analisadas em lupa estereoscópica e as áreas soldadas foram calculadas para avaliar a penetração da solda. Os resultados foram submetidos à Análise de Variância sendo posteriormente aplicados os testes de Dunnet e Tukey. Analisando a tensão máxima e a porcentagem de área soldada, observou-se que houve diferença estatística entre os grupos. Analisando a porcentagem de alongamento, houve diferença estatisticamente significativa entre o grupo controle e os grupos experimentais, mas não entre os grupos experimentais. Houve uma correlação positiva entre a porcentagem de área soldada e a tensão máxima em todas as amostras dos grupos experimentais e uma correlação negativa entre esses parâmetros e o diâmetro dos corpos de prova. O diâmetro de 2.5 mm e 3.0 apresentaram os maiores valores de resistência à tração e porcentagem de área soldada, e parece ser a melhor opção para a união de barras pré-fabricadas para uso em estruturas protéticas submetidas ao processo de soldagem a laser.

Palavras Chave: Soldagem à Laser, Liga de Ti-6Al-4V, Resistência à Tração, Comportamento Mecânico.

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the mechanical resistance of Ti-6Al-4V alloy in different diameters submitted to the processes of Laser welding by means of Tensile test. Twenty-five dumbbell-shaped rods (n=5) were created and divided in 5 groups: Control group with 3 mm diameter, constituted by intact bars and L2.5, L3, L4 and L5 groups with 2.5, 3, 4 and 5 mm diameters submitted to Laser welding process. The specimens were tested for tensile strength test until fracture and the percentage of elongation was obtained. Fractured samples were analyzed in stereomicroscope and the welded areas percentage was calculated. The results were evaluated by analysis of variance and subsequently using Dunnet and the Tukey test. Analyzing the tensile strength and the welded area percentage there were statistical difference between groups. Analyzing the percentage of elongation there was statistical difference between control group and test groups but not among test groups. There was a positive correlation between welded area percentage and tensile strength in all the specimens in the test groups and a negative correlation between these parameters and the diameters of the specimens. The diameter of 2.5 mm and 3.0 showed the highest values of tensile strength and percentage of welded area and appears to be the best option for the union of prefabricated structures for use in prosthetic subjected to laser welding.

Keywords: Laser welding, Ti-6Al-4V alloy, Tensile strength, Mechanical behavior.

1- INTRODUÇÃO

O processo de soldagem pode ser definido como processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos (Marques et al., 2007). Outra definição, meramente operacional, proposta pela AWS é “operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem aplicação de pressão e de metal de adição” (Marques et al., 2007), produzindo peças com uniões soldadas fortes, não porosas e sem corrosão (Byrne, 2011).

Atualmente mais de 50 diferentes processos de soldagem têm alguma utilização industrial e é o mais importante método para união permanente de metais. Esta importância é ainda mais evidenciada pela presença de processos de soldagens e afins nas mais diferentes atividades (Marques et al., 2007).

As soldagens convencionais ou Brasagem têm sua aplicação sustentada há anos, devido ao baixo custo e relativa efetividade. No entanto, problemas como oxidação das faces unidas pela solda, porosidade na junta e superaquecimento do local de união durante o processo podem promover pequenos defeitos estruturais e posteriormente fracasso do tratamento reabilitador (Tehini & Stein, 1993; Silva, 2007). Diante destas limitações, pesquisas surgiram neste campo gerando novas tecnologias e técnicas alternativas de soldagem, como as soldagens a arco elétrico (soldagem Plasma e TIG – Tungsten Inert Gas) e soldagem a Laser.

A soldagem TIG é um processo no qual a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento e fusão destas através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não-consumível, e as peças a unir. A proteção do eletrodo e da zona a ser soldada é feita por um gás inerte, normalmente o argônio (Rocha et al., 2006), ou mistura de gases inertes (Argônio e Hélio). A soldagem TIG é um processo dos mais versáteis em termos de espessuras e ligas soldáveis, produzindo soldas de ótima qualidade (Marques et al., 2007).

A soldagem a Laser é um processo de união baseado na fusão localizada da junta por meio de seu bombardeamento por um feixe de luz concentrada, coerente e monocromática de alta intensidade (Marques et al., 2007). Uma das suas maiores vantagens é que ela produz um *Keyhole* que concentra a energia absorvida em uma pequena região, resultando em alta penetração e formação de estreita zona afetada pelo calor (ZAC) (Chai & Chou, 1998; Liu et al., 2002; Rocha et al., 2006). Apresenta vantagens como poder ser aplicada em estruturas

recobertas com porcelana ou resina, possibilidade de se soldar sobre o modelo de trabalho sem a necessidade de inclusão em revestimento e soldagem de lugares de difícil acesso (Souza et al., 2000). Desta forma, a solda a laser é bem aceita por ser capaz de produzir soldagem precisa e causar uma estreita zona de calor, provocando assim menor distorção (Hart & Wilson, 2006).

Entretanto, algumas limitações da soldagem devem ser consideradas, uma vez que, praticamente, todos os processos de soldagem são baseados na aplicação, na região da junta, de energia térmica ou mecânica, o que tende a causar uma série de efeitos mecânicos e metalúrgicos desfavoráveis. Estes efeitos, juntamente com a formação de descontinuidades como poros e trincas na solda, podem prejudicar o desempenho dos componentes soldados e causar a falha prematura da estrutura (Maques *et al.*, 2007).

Na odontologia, o emprego da soldagem entre os elementos pilares, durante a fase de confecção da estrutura metálica ou até mesmo após a aplicação de cerâmica, tem sido um artifício utilizado por grande parte dos cirurgiões-dentistas na solução de problemas relacionados às distorções laboratoriais que acabam refletindo em desconfortos das peças protéticas. A técnica de soldagem apresenta a vantagem de se trabalhar com segmentos da prótese, gerando estruturas protéticas com menores distorções, o que permite melhor adaptação aos pilares. Isso promove distribuição uniforme de forças, minimizando traumas ou falhas no osso, no implante ou na prótese (Chai & Chou, 1998; Tiozzi et al., 2010).

A obtenção destas juntas soldadas em Odontologia vem se aprimorando com o desenvolvimento e a incorporação de conhecimentos de outras áreas como a engenharia, que tem possibilitado o surgimento de novas técnicas e equipamentos como uma alternativa à técnica convencional com maçarico (Marques et al. 2007), dentre as quais podem ser citadas: soldagem a laser (Gordon & Smith, 1970; Nabadalung & Nicholls, 1998), soldagem a arco elétrico em atmosfera de gás inerte – TIG (Wang & Welsch, 1995; Bezerra et al., 1999).

Além disso, o titânio e suas ligas têm sido usados em diversas aplicações como a aeroespacial, automobilística, médica e petroquímica. Sua excelente relação entre resistência mecânica e peso, a alta resistência à corrosão, biocompatibilidade e menor perda de propriedades em temperaturas de trabalho elevadas, fazem dele um material desejado no meio industrial quando deseja-se aliar boa resistência mecânica e à corrosão e baixa densidade (Wang & Welsch, 1995). Eles também são chamados de superligas. É muito utilizado também na indústria médico-odontológica para a fabricação de próteses de joelhos, fêmur, implantes dentários dentre outros.

No entanto, o maior obstáculo à difusão da utilização do titânio encontra-se nas características específicas do processo de fundição deste metal, que apresenta alto ponto de fusão (1700° C) e alta reatividade química com oxigênio quando aquecido a temperaturas elevadas (acima de 600° C), necessitando desta forma, equipamento especial que impeça a contaminação do metal (Taira et al., 1989), como a soldagem a laser que é o método mais utilizado para corrigir o desajuste de peças confeccionadas em titânio aos seus respectivos pilares. Por este motivo, a utilização deste material desperta o interesse de pesquisadores com o intuito de avaliar as consequências deste procedimento sobre a qualidade da peça finalizada (Berg et al., 1995; Liu et al., 2002; Zavanelli et al., 2004).

Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi avaliar a resistência mecânica de liga de Ti-6Al-4V em diferentes diâmetros submetidos ao processo de soldagem Laser por meio de ensaio de resistência à tração gerando a hipótese de que o aumento do diâmetro influenciará positivamente nos valores de resistência de tração.

2- MATERIAL E METÓDOS

2.1. Grupos estudados

Foram confeccionados 25 corpos de prova em formato de halteres de liga de Ti-6Al-4V, divididos em cinco grupos (n=5), de acordo com a tabela 1: Grupo Controle com diâmetro de 3 mm, constituídos por corpos de prova intactos e Grupos L2.5, L3, L4 e L5 com diâmetros de 2.5, 3, 4 e 5 mm respectivamente e submetidos ao processo de soldagem Laser.

Tabela 1: Características do grupo controle e experimentais.

Grupo	Número de Amostras	Diâmetro	Pulso (ms)	Profundidade (A ou V)
Controle	5	3	-	-
L2.5	5	2.5	9	365 V
L3	5	3	9	365 V
L4	5	4	9	365 V
L5	5	5	9	365 V

2.2. Confeção e preparo dos corpos de prova

Os corpos de prova foram obtidos a partir da usinagem de barras pré-fabricadas de liga de Ti-6Al-4V de 10 mm de diâmetro (Realum, Indústria e Comércio de Metais Puros e Ligas

LTDA, São Paulo, SP, Brasil), cujas informações, fornecidas pelo fabricante, estão na tabela 2, em formato de halteres em diferentes diâmetros (2,5, 3, 4 e 5 mm), sendo suas dimensões obtidas a partir da norma ASTM E 8, como demonstrado na figura 1. As amostras foram usinadas em torno mecânico (PRN 320 IMOR, Indústria Romi S.A., Santa Bárbara D'Oeste, SP, Brasil), lotado no Laboratório de Projetos Mecânicos Prof. Henner Alberto Gomide da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (LPM/FEMEC/UFU) (Figura 2a). Os grupos experimentais foram usinados em suas metades para posteriormente serem soldados (Figura 2b) e as amostras do grupo controle foram usinadas intactas.

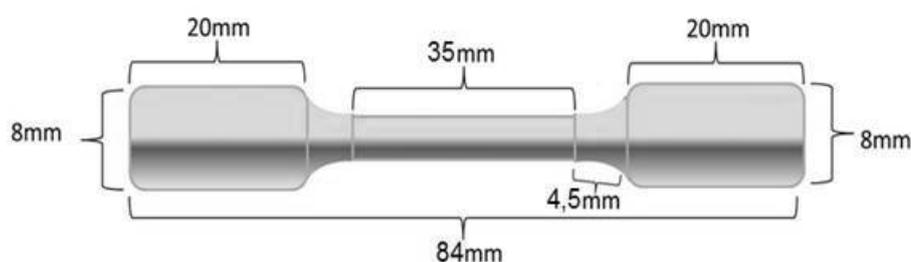


Figura1: Dimensões do corpo de prova.

Tabela 2: Composição da liga Ti-6Al-4V

TI-6AL-4V		
	Min.	Max.
N	-	0,05
C	-	0,08
H	-	0,0125
Fe	-	0,25
O2	-	0,13
Al	5,5	6,50
V	3,5	4,50
Ti	.	Bal.

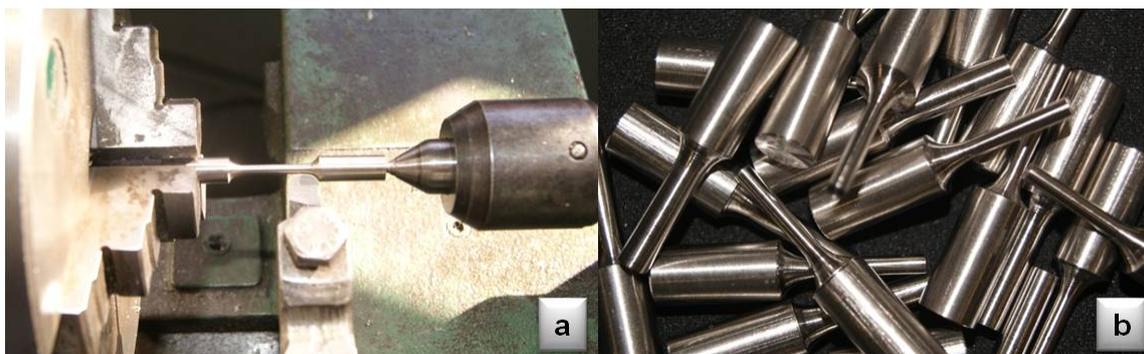


Figura 2: a) Montagem do experimento para usinagem dos corpos de prova; b) Metades dos corpos de prova.

Após a usinagem, os corpos de prova foram enumerados, com broca esférica 1011 (KG SORENSEN – Medical Burs Indústria e Comércio de Pontas e Brocas Cirúrgicas Ltda, Cotia, São Paulo) acoplada à caneta de alta rotação, nas extremidades para facilitar sua identificação (Figura 3) tanto no momento da soldagem como no momento de avaliação em Lupa estereoscópica.



Figura 3 – Marcação dos corpos de prova.

Estes foram colocados em aparelho de ultrassom (Thornton T14), lotado no Laboratório de Prótese Fixa da Escola Técnica de Saúde da Universidade Federal de Uberlândia (ESTES/UFU) com álcool 99,5° GL (EMFAL LTDA, Betim, MG, Brasil) por 10 minutos para realizar a limpeza da superfície. Ao final, foram adequadamente secos com papel absorvente para que o processo de soldagem pudesse ser realizado.

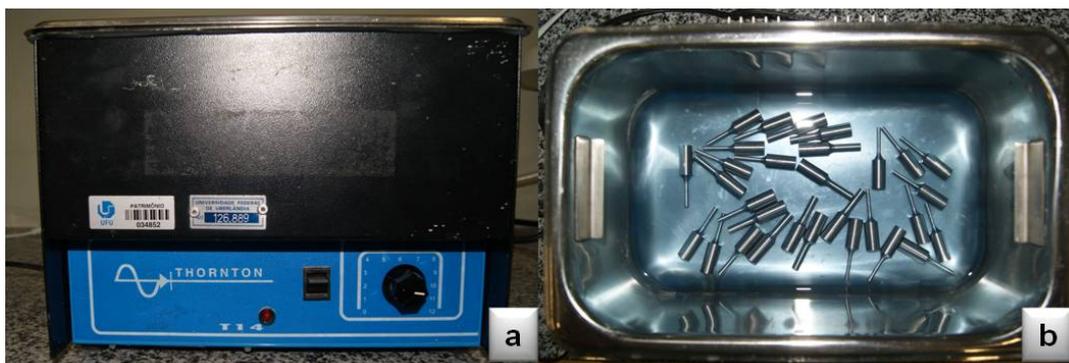


Figura 4: a) Aparelho de ultrassom; b) Amostras embebidas pelo álcool 99,5° dentro da cuba do aparelho.

2.3. Processos de Soldagem

As metades dos corpos de prova dos grupos experimentais foram unidas por meio de um dispositivo metálico confeccionado especialmente para esse trabalho, que permite a padronização da posição de soldagem (Figura 5). As amostras foram colocadas topo-a-topo com uma distância de 0.0mm de distância entre as metades.



Figura 5: Dispositivo para padronização da posição da soldagem

A soldagem laser foi realizada em uma soldadora a Laser (Desktop – Dentaurum JP Winkelstroter KG, Pforzheim, Alemanha), que utiliza um cristal de ND:YAG como fonte de luz, programada para 365V/9ms (para todos os diâmetros) com foco e frequência em zero, lotada no Laboratório de Prótese Removível da Faculdade de Odontologia de Piracicaba da Universidade Estadual de Campinas (FOP/UNICAMP) (Figura 6a).

As amostras foram posicionadas no interior da câmara de soldagem, sendo disparados dois pontos iniciais de solda em regiões diametralmente opostas sob atmosfera protetora de argônio (Figura 6b). Após a fixação inicial, o dispositivo foi removido para facilitar o restante da soldagem.

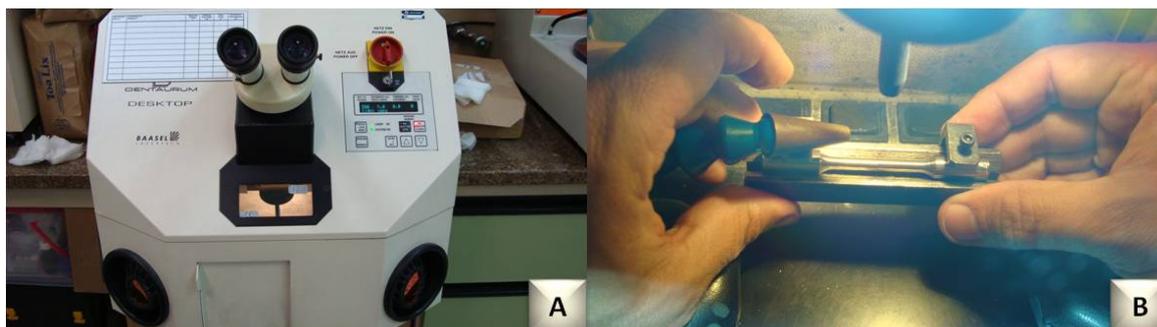


Figura 6: a) Aparelho de solda Laser e b) Amostra posicionada na câmara do aparelho.

2.4. Ensaio Mecânico de Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração foi realizado em máquina servico hidráulica MTS® 810 (Material Test System Corporation, Minneapolis, Minesota, USA), lotada no Laboratório de Projetos Mecânicos Prof. Dr. Henner Alberto Gomide da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (LPM/FEMEC/UFU) e célula de carga de 2.500 KGF, com velocidade de 0,02mm/min (Figura 7a e b).

O ensaio foi considerado finalizado com a ruptura dos corpos de prova, sendo registrados nesse momento os valores de tensão máxima (Mpa) (Figura 8a) e o próprio programa forneceu o gráfico de força-deslocamento (Figura 8b).

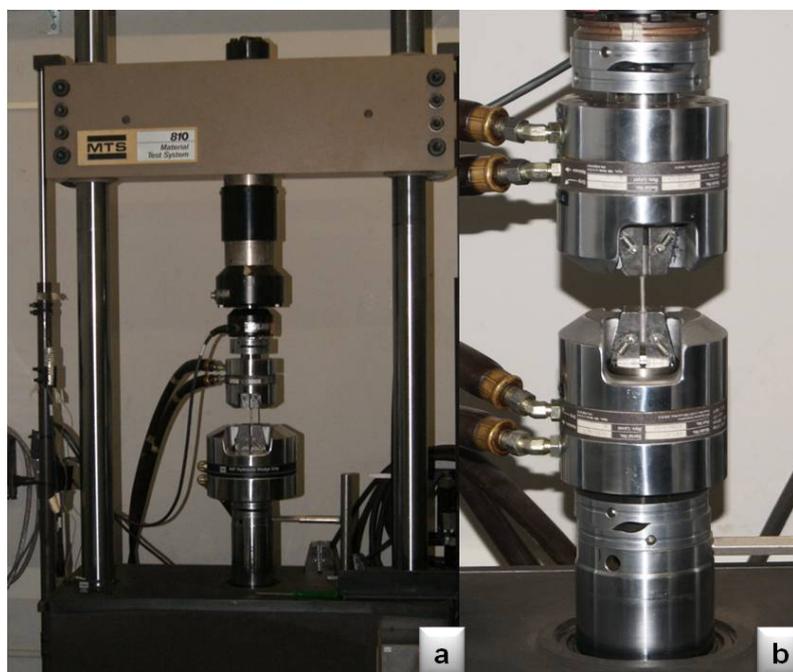


Figura 7: a) Máquina de ensaios mecânicos MTS® 810 e b) Detalhe da garra da máquina com corpo de prova posicionado.

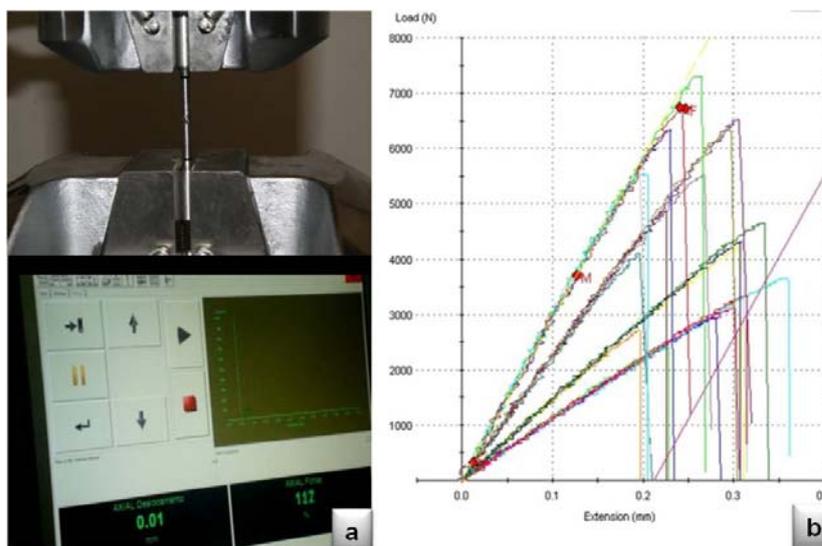


Figura 8: a) Computador acoplado à célula de carga; b) Gráfico força x deslocamento.

2.5 Porcentagem de alongamento

Obteve-se o percentual de alongamento subtraindo-se o comprimento inicial do comprimento final e dividindo-se o resultado pelo comprimento inicial. Em linguagem matemática, esta afirmação pode ser expressa pela seguinte igualdade.

$$A = \frac{L_f - L_o}{L_o} \quad (1)$$

Fórmula 1 – Fórmula do percentual de alongamento, em que L_o representa o comprimento inicial antes do ensaio e L_f representa o comprimento final após o ensaio. Para achar a porcentagem de alongamento multiplica-se o resultado por 100.

2.6 Avaliação em Lupa estereoscópica

Após o ensaio de resistência à tração, as amostras foram submetidas à avaliação da penetração da solda na região da fratura, por meio de Lupa estereoscópica (Leica MS5, Leica Microscopy Systems Ltd. Heerbrugg - Switzerland) (Figura 9a), lotada no Laboratório Integrado de Pesquisa Odontológica da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia (LIPO/FOUFU), com iluminação externa, sob aumento de 2.5x para os diâmetros 2.5 e 3 mm e aumento de 1.6x para os diâmetros 4 e 5 mm. Como 19 das 20 amostras sofreram ruptura na região da solda, todas as imagens capturadas foram analisadas no software Motic Images Plus 2.0ML for Windows (Motic instruments, INC, Richmond, Canadá) onde foram feitas as delimitações das áreas soldadas (Figura 9b) e o cálculo dessas

áreas, que posteriormente foram convertidas em porcentagem de área soldada para efeito de comparação entre os diferentes diâmetros.

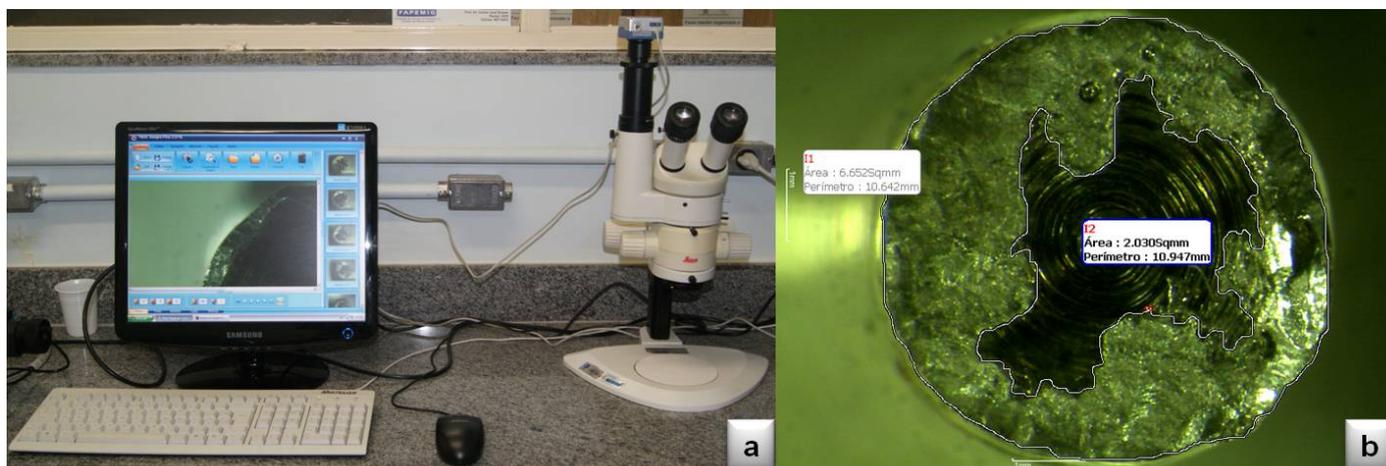


Figura 9: a) Lupa Estereoscópica; b) Exemplo de imagem gerada pela lupa estereoscópica e de como foram realizadas as medidas da área de penetração no software.

2.7 Análise estatística

Uma vez que os dados de tensão máxima, porcentagem de área de solda e porcentagem de alongamento apresentaram distribuição normal (Shapiro-Wilk, $p > 0,05$) e de homogeneidade de variância (Teste de Levene, $p > 0,05$) foram usados testes estatísticos paramétricos. Os dados de tensão máxima e porcentagem de área de solda foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) em seguida, o teste de Dunnett foi usado para comparação dos grupos testados com o grupo controle, teste de Tukey para verificar diferenças entre os grupos testados. O teste de correlação de Pearson averiguou a correlação entre os valores de tensão máxima e porcentagem de área soldada e o teste de correlação de Spearman's avaliou a correlação entre o diâmetro e os valores de tensão máxima e porcentagem de área soldada. Todos os testes foram realizados no programa SigmaStat 3.5 com um nível de probabilidade de 95% ($\alpha=0,05$).

3- RESULTADOS

As médias e desvio padrão para o parâmetro tensão máxima estão descritos na tabela 3. O grupo controle ($1008,46 \pm 37,1$) apresentou maiores valores de tensão máxima do que os

grupos experimentais. Dentro dos grupos experimentais o grupo L2.5 ($762,94 \pm 133,57$) e L3 ($601,93 \pm 232,99$) apresentaram maiores valores de tensão máxima e os grupo L4 ($542,78 \pm 179,98$) e L5 ($515,57 \pm 154,23$) apresentaram os menores valores.

Tabela 3: Valores de tensão máxima (Unidade: Mpa) para Solda Laser

Grupo	Controle	L2.5	L3	L4	L5
01	1000,32	760,48	413,37	740,68	313,29
02	1072,93	748,29	374,12	334,75	609,07
03	990,78	968,34	959,47	677,69	698,08
04	978,56	743,78	623,52	377,57	409,89
05	999,72	593,85	639,18	583,19	547,53
Média	1008,46 ^A	762,94 ^B	601,93 ^{BC}	542,78 ^C	515,57 ^C
Desvio Padrão	37,1	133,57	232,99	179,98	154,23

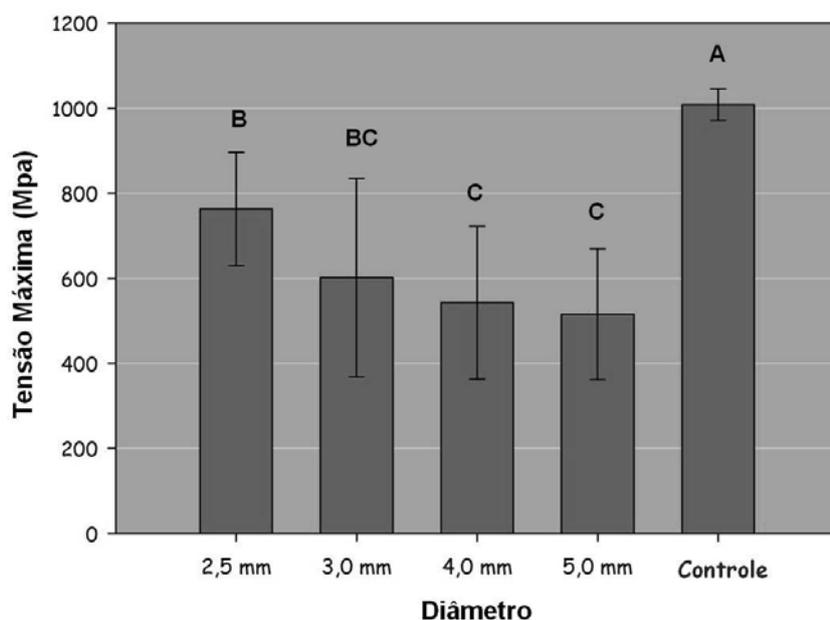


Figura 10 - Tensão máxima para solda Laser.

As médias e desvio padrão da porcentagem de alongamento estão presentes na tabela 4. As médias de porcentagem de alongamento para todos os grupos testes variam entre 0,78% (grupo L5) à 1,98% (grupo L2.5), e a média para o grupo controle foi 7,48%. Houve diferença

estatisticamente significativa entre o grupo controle e os grupos experimentais, mas não houve diferença estatística entre os grupos experimentais.

Tabela 4: Porcentagem de alongamento (Unidade: %) para Solda Laser

Grupo	Controle	L2.5	L3	L4	L5
01	6,00	1,04	0,58	0,89	0,86
02	8,86	5,11	1,08	0,61	0,63
03	7,71	2,33	2,37	1,49	0,86
04	6,57	0,86	0,40	0,97	1,20
05	8,28	0,55	0,92	1,07	0,35
Média	7,48 ^A	1,98 ^B	1,07 ^B	1,01 ^B	0,78 ^B
Desvio Padrão	1,18	1,88	0,77	0,32	0,31

As médias e desvio padrão para porcentagem de área soldada estão descritos na tabela 5. Como as amostras foram previamente numeradas em a e b e todas as amostras sofreram completa ruptura, os valores foram descritos em 1a, 1b, 2a, 2b e assim por diante. Houve diferença estatística significativa entre os grupos testes. Os grupos PL2.5 ($73,21 \pm 8,03$) e PL3 ($70,91 \pm 8,02$) apresentaram os maiores valores de porcentagem de área soldada e o grupos PL4 ($56,03 \pm 2,80$) e PL5 ($52,57 \pm 7,48$) os menores.

Tabela 5: Porcentagem de área de solda (unidade %) para Solda Laser

Grupo	L2.5	L3	L4	L5
1a	69,04	82,11	59,27	39,45
1b	60,01	75,85	55,29	38,93
2a	84,64	65,42	59,57	56,54
2b	84,64	64,63	55,66	55,83
3a	74,19	79,91	56,01	56,69
3b	70,59	71,99	54,95	58,12
4a	65,04	66,29	58,84	53,08
4b	70,77	59,77	57,15	50,55
5a	80,04	79,69	52,28	59,21
5b	73,11	63,41	51,28	57,26
Média	73,21 ^A	70,91 ^A	56,03 ^B	52,57 ^B
Desvio Padrão	8,03	8,02	2,80	7,48

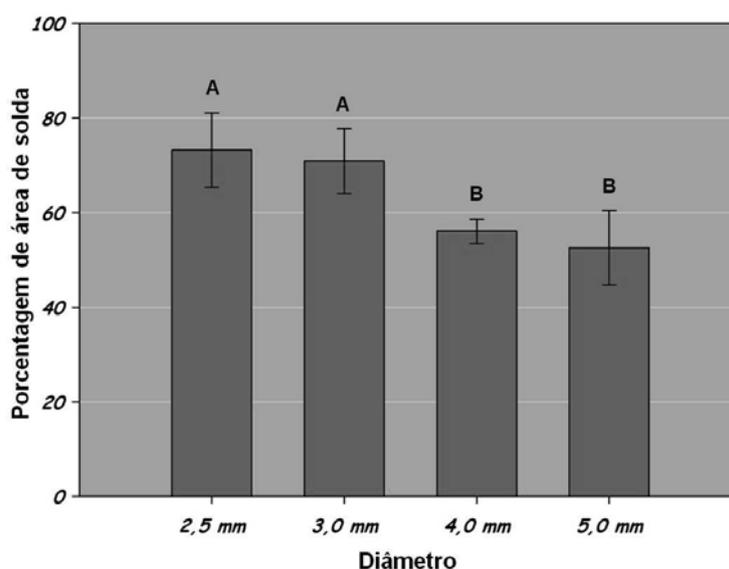


Figura 11 - Porcentagem de área de solda para solda Laser.

As figuras abaixo (Figuras 12 a 15) são referentes às imagens obtidas na lupa estereoscópica para os corpos de prova soldados com Solda Laser após o ensaio de resistência

à tração. As imagens demonstram que a solda não penetra por todo o diâmetro do corpo de prova, deixando o centro da amostra sem solda e este achado foi consistente em quase todas as amostras. Dos vinte corpos de prova dos grupos experimentais, dezenove fraturaram na área soldada.

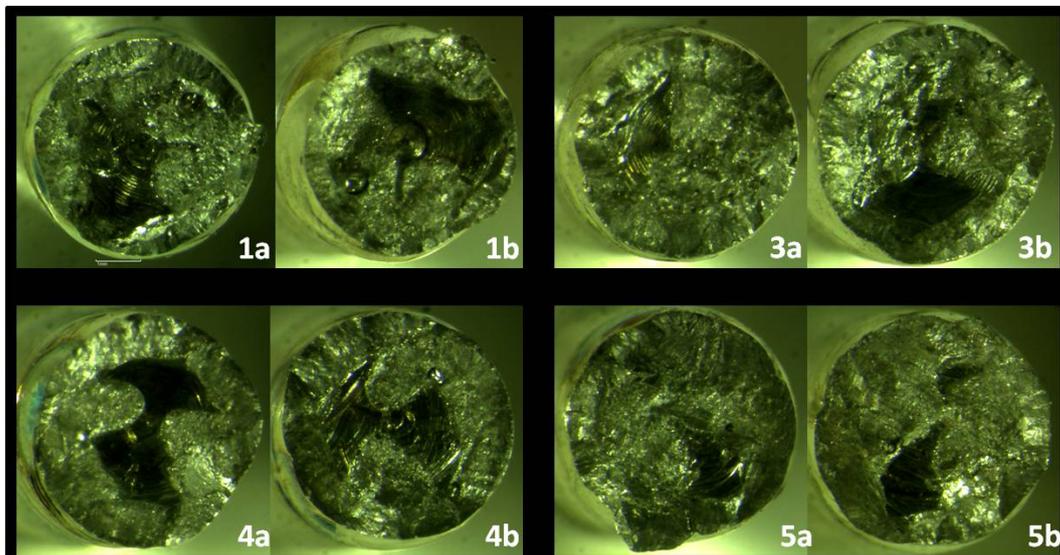


Figura 12 – Imagens obtidas por meio de lupa estereoscópica para os corpos de prova do grupo L2.5.

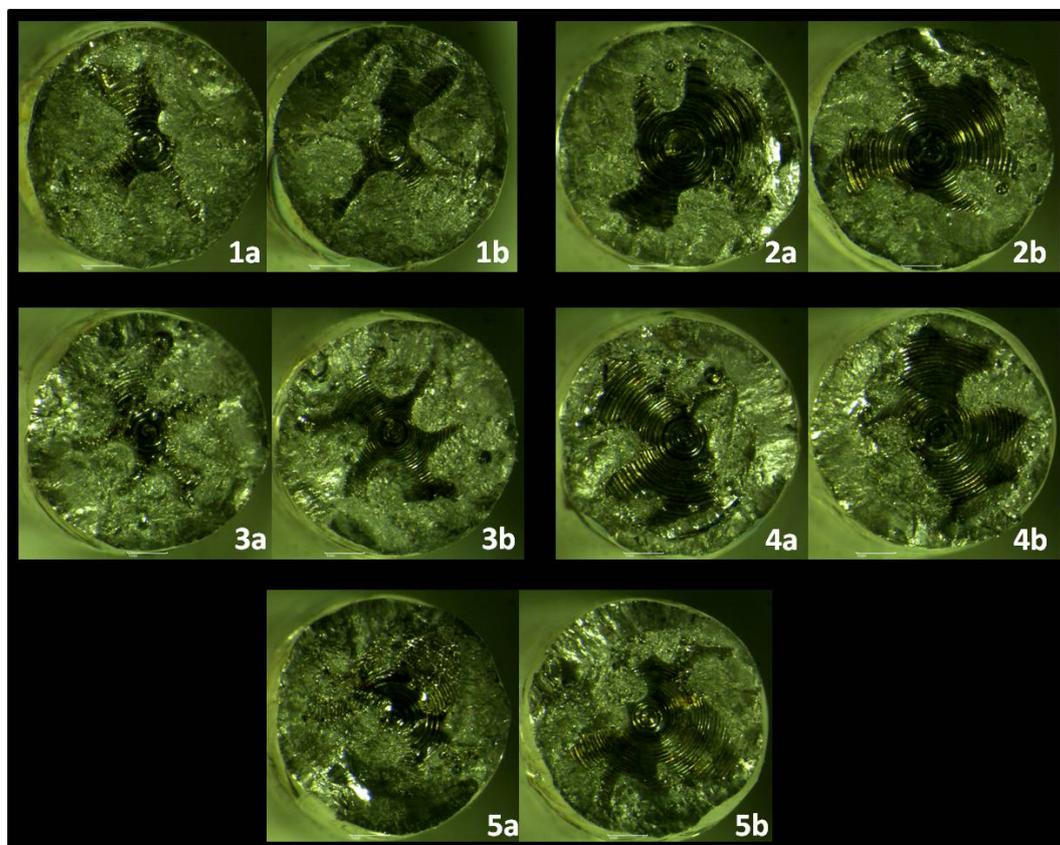


Figura 13 – Imagens obtidas por meio de lupa estereoscópica para os corpos de prova do grupo L3.

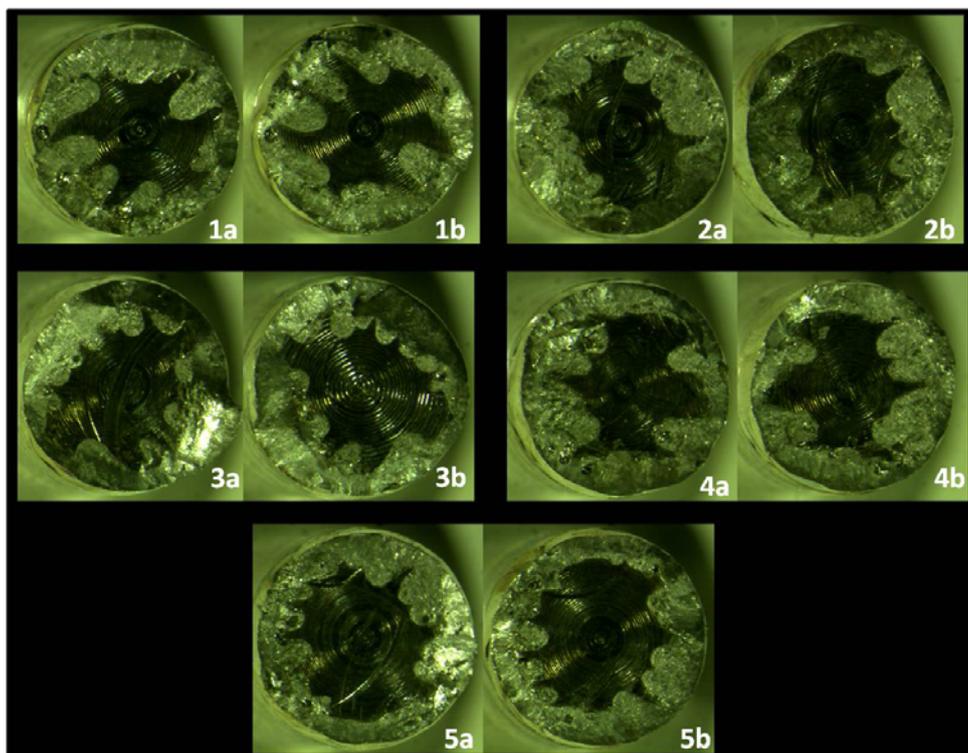


Figura 14 – Imagens obtidas por meio de lupa estereoscópica para os corpos de prova do grupo L4.

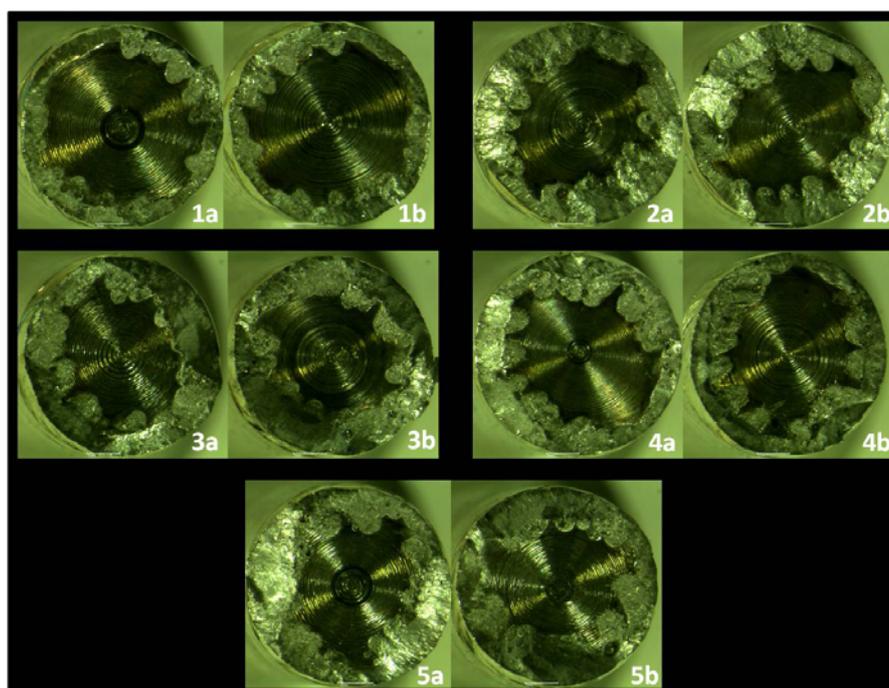


Figura 15 – Imagens obtidas por meio de lupa estereoscópica para os corpos de prova do grupo L5.

Em relação aos testes de correlação, foi possível observar a partir do teste de correlação de Pearsons que houve uma correlação positiva, embora fraca, mas que conclui que quanto maior foi a tensão máxima maior foi a porcentagem de área soldada (0.472) e a partir do teste de correlação de Spearman's que houve uma correlação negativa forte em que quanto menor foi o diâmetro do corpo de prova maior foi a porcentagem de área soldada (-0.807) e maior foi a tensão máxima (-0.535).

4- DISCUSSÃO

Os resultados observados da figura 10 mostram que o grupo controle apresentou os maiores resultados para resistência à tração quando comparado aos grupos experimentais. Tal fato pode ser explicado pela mudança na microestrutura do metal após a solda, quando o mesmo é aquecido até sua temperatura de derretimento e solidificado novamente (Neo et al., 1996). Nesse processo, o titânio alcança temperaturas em que o metal apresenta alta afinidade com elementos como oxigênio, hidrogênio e nitrogênio livres, agregando-os a sua estrutura, tornando-a rica em impurezas, resultando em redução na qualidade de suas propriedades, como menor ductilidade e menores valores de resistência à tração (Botega, 2005). É comum em fundições de titânio a presença de porosidades no metal fundido que representam pontos de concentração de tensão (Brick et al., 1965; Neo et al., 1996).

Baba & Watanabe, 2005, observaram que a profundidade de penetração da solda no metal é o principal fator que afeta a resistência das próteses cujas infra-estruturas foram submetidas à técnica de soldagem, uma vez que, quanto maior a profundidade alcançada, menor quantidade de vazios internos. Wang & Welsch, 1995, observaram que a localização de metal fundido apenas na periferia da amostra fragiliza a união e a resistência da peça como um todo. Neste trabalho, este fato pode ser observado através das figuras 12 a 15, notando que a medida que aumenta o diâmetro das estruturas, mantendo a mesma profundidade de soldagem, a solda se concentra mais na periferia dos corpos de prova, e quanto maior o diâmetro do corpo de prova menor é a resistência mecânica.

Ainda em relação à profundidade de penetração da solda, Shimakura et al., 2009 observaram em seu trabalho que estruturas metálicas com espessura inferior a 2mm apresentaram uma maior penetração da solda a Laser. Analisando a figura 11, podemos observar que os corpos de prova de 4.0 e 5.0mm apresentaram menor porcentagem da área de solda. A penetração do feixe de laser limitada a 1,5 mm de profundidade (Roggensack *et al.*, 1993; Neo et al., 1996; Tambasco et al., 1996; Baba & Watanabe, 2005), o que causa

diminuição nos valores de resistência à tração nas amostras de maior diâmetro por não haver soldagem completa na parte interna.

Além dos parâmetros de soldagem, as características do metal como taxa de absorção do laser e condutibilidade térmica também influenciam na penetração do laser. Quanto maior a taxa de absorção do laser e menor a condutibilidade térmica, maior a profundidade de alcance do laser, que é o caso do titânio (Liu *et al.*, 2002). A baixa condutibilidade térmica concentra a energia do laser na zona da solda, por isso a zona afetada pelo calor na soldagem a laser do titânio é pequena, resultando em menor risco de distorção da peça (Botega, 2005).

Quanto à localização da fratura após o ensaio de resistência à tração é importante destacar que o corpo de prova 2a (2,5mm) sofreu ruptura no metal base e não na área soldada, podendo inferir que a solda a laser afetou o mínimo possível as propriedades da liga de titânio estudada, assemelhando então ao grupo controle. Fato que também se associa ao preenchimento efetivo da solda no grupo experimental L2,5 que obtiveram os maiores valores para a porcentagem de área de solda, juntamente com o grupo L3, concordando então com Berg *et al.*, 1995, que observaram que a fratura deverá ocorrer no metal original quando a solda laser não deixar espaços vazios internos, os quais podem ser visualizados através das figuras 12 a 15.

Os corpos de provas de 2,5 e 3,0mm são as estruturas que mais se aproximam das estruturas metálicas utilizadas nos procedimentos odontológicos, e também foram as estruturas que apresentaram melhores resultados para área soldada e resistência mecânica, porém os resultados obtidos ainda foram inferiores em relação ao grupo controle (sem solda). Estudos futuros devem buscar analisar as diferentes formas de secção, a variação de técnicas de soldagem e também o número de pontos de solda, como forma de tentativa para diminuir a diferença dos resultados.

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que o processo de solda a laser na liga de Ti6Al4V possibilitou excelente resistência mecânica nas condições investigadas, diminuindo então o risco de fraturas. Porém, em condições clínicas há a presença de outros tipos de forças que não foram avaliadas neste trabalho, sendo necessário então realizar mais estudos para acompanhar a longevidade do processo de soldagem a laser frente a outros tipos de ensaios mecânicos.

5- CONCLUSÃO

Dentro das limitações deste estudo, o diâmetro de 2.5 mm e 3.0 apresentaram os maiores valores de resistência à tração e porcentagem de área soldada e parecem ser a melhor opção para união de barras pré-fabricadas para emprego em estruturas protéticas para solda Laser. Houve uma correlação positiva entre a porcentagem de área soldada e resistência à tração em todos os corpos de prova dos grupos experimentais e uma correlação negativa entre estes parâmetros e o diâmetro da amostra.

6- AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Cnpq pelo apoio financeiro necessário para a realização desta pesquisa, à Escola Técnica de Saúde (ESTES-UFU). Ao Laboratório de Projetos Mecânicos “Hener Alberto Gomide” da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC-UFU). Ao Laboratório Integrado de Pesquisa Odontológica (LIPO) da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia (FOUFU), e ao mestrando Rodrigo Dantas Pereira pelo auxílio com a análise estatística.

7- REFERÊNCIAS

American Society for Testing and Materials International. Designation: E 8M – 04: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]. West Conshohocken: ASTM; 2004. 24 p.

Baba, N.; Watanabe I. Penetration depth into dental casting alloys by Nd:YAG laser. J Biomed Mater Res B Appl Biomater 2005; 72: 64–68.

Berg, E.; Wagner, W.C.; Davik, G.; Dootz, E.R. Mechanical properties of laser-welded cast and wrought titanium. J Prosthet Dent. 1995; 74 (3): 250-257.

Bezerra, R.M; Souza, P.C.R.D; Ramires, I.; Bottino, M.A.; Guastaldi, A.C. Microestrutura e resistência à corrosão do Ti c.p. soldado a laser utilizando em prótese sobre implantes. Eclét Quim. 1999; 24: 113-124.

Botega, D.M. Resistência à tração do titânio comercialmente puro soldado a laser em diferentes distâncias e diâmetros. Piracicaba, SP : [s.n.], 2005.

Byrne G. Soldering in Prosthodontics—An Overview, Part I. *Journal of Prosthodontics*. 2011; 1–11.

Brick, R.M.; Gordon, R.B.; Phillips, A. *Structure and properties of alloys*. 3.ed. McGraw-Hill Book Company, 1965.

Chai T, Chou CK. Mechanical properties of laser-welded cast titanium joints under different conditions. *J Prosthet Dent*. 1998; 79(4):477-483.

Gordon, T.E.; Smith, D.L. Laser welding of prostheses – an initial report. *J. Prosthetic. Dent.*, v.24, n.4, p.472-6, oct. 1970.

Hart, C.N.; Wilson, P.R. Evaluation of welded titanium joint used with cantilevered implant-supported prostheses. *J Prosthet Dent*. 2006; 96: 25-36.

Liu, J.; Watanabe, I.; Yoshida, K.; Atsuta, M. Joint strength of laser-welded titanium. *Dent Mater*. 2002; 18: 143-148.

Marques, P.V.; Modenesi, P.J.; Bracarense, A.Q. *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*, editora UFMG, 2ª edição, 363 p, 2007.

Nabadalung, D.P.; Nicholls, J.I. Laser welding of a Cobalt- Chromium removable partial denture alloy. *J. Prosthet. Dent.*, v.79, n.3, mar. 1998.

Neo, T.; Chai, J.; Gilbert, J.L.; Wozniak, W.T.; Engelman, M.J. Mechanical properties of titanium connectors. *Int J Prosth*. 1996; 9 (4): 379-392.

Pedrazzini, M.C.; Wassall, T. Falhas de fundição nas infraestruturas de próteses ferulizadas sobre implantes: ensaio in vitro. *RGO, Porto Alegre*, v. 57, n.2, p. 165-172, abr./jun. 2009.

Rocha R, Pinheiro AL, Villaverde AB. Flexural strength of pure Ti, Ni-Cr and Co-Cr alloys submitted to Nd:YAG laser or TIG welding. *Braz Dent J*. 2006;17(1):20-3.

Roggensack, M.; Walter, M.H.; Böning, K.W. Studies on laser- and plasma-welded titanium. *Dent Mater*. 1993; 9 (2): 104-107.

Shimakura, M.; Yamada, S.; Takeuchi, M.; Miura, K.; Ikeyama, J. Influence of irradiation conditions on the deformation of pure titanium frames in laser welding. *Dental Materials Journal* 2009; 28(2): 243-247.

Silva, J. Avaliação da Resistência flexural entre diferentes métodos de soldagem: chama direta – TIG- laser. 2007. 109p. Dissertação de mestrado, Faculdade de Odontologia de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto.

Souza, P.C.R.D.; Dinato, J.C.; Beatrice, C.R.S.; Guastaldi, A.C.; Bottino, M.A. Soldagem na Odontologia: estudo de uniões soldadas empregando laser e brazagem. Revista da APCD 2000; 54 (6): 470-475.

Taira, M.; Moser, J.B.; Greener, E.H. Studies of Ti alloys for dental castings. Dent Mater. 1989; 5: 45-50.

Tambasco J, Anthony T, Sandven O. Laser welding in the dental laboratory: an alternative to soldering. J Dent Technol. 1996; 13 (4): 23-31.

Tehini, G. E.; Stein, R. S. Comparative Analysis of Two Techniques for Soldered Connectors. J Prosthet Dent, v. 69, n. 1, p. 16-19. 1993.

Tiossi, R.; Falcão-Filho, H.; Aguiar Júnior, A.; Rodrigues, R.C.; de Mattos M. da G.; Ribeiro R.F. Modified section method for laser-welding of ill-fitting cp Ti and Ni-Cr alloy one-piece cast implant-supported frameworks. Dental School of Ribeirão Preto, University of São Paulo, Dental Materials and Prosthodontics, Ribeirão Preto, SP, Brazil. J Oral Rehabilitation; 37: 359-363; 2010.

Wang, R.R.; Welsch, G.E. Joining titanium materials with tungsten inert gas welding, laser welding, and infrared brazing. J Prosthet Dent. 1995;74(5):521-30.

Zavanelli, R.A.; Guilherme, A.S.; Henriques, G.E.P.; Nóbilo, M.A.A.; Mesquita, M.F. Corrosion-fatigue of laser-repaired commercially pure titanium and Ti-6Al-4V alloy under different test environments. J Oral Rehabil. 2004; 31: 1029-1034.