

## **DESEMPENHO DA SOLDA PLASMA EM DIFERENTES DIÂMETROS DE LIGA DE TI6AL4V**

POLLIANA OLIVEIRA MARTINS<sup>1</sup>, JOÃO PAULO LYRA E SILVA<sup>2</sup>; MORGANA GUILHERME DE CASTRO<sup>2</sup>; CLEUDMAR AMARAL ARAÚJO<sup>3</sup>; PAULO CEZAR SIMAMOTO JÚNIOR<sup>4</sup>

1. Acadêmica do Curso de Odontologia da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia. Bolsista do Programa de Iniciação Científica da FAPEMIG 2010-2011 – SAU19/2009. Rua Souza Costa, 250, Maracanã, Uberlândia/MG, CEP: 38400-232 (polly-martins@hotmail.com).
2. Mestrandos em Odontologia da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia.
3. Professor Doutor da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.
4. Professor Doutor do Curso Técnico em Prótese Dentária da Escola Técnica de Saúde da Universidade Federal de Uberlândia. Avenida Amazonas, s/nº, Bloco 4K, Campus Umuarama, Uberlândia/MG-Brasil, CEP: 38400-902.

## RESUMO

Este trabalho teve por objetivo avaliar o comportamento mecânico de liga de titânio (Ti6Al4V) em diferentes diâmetros (2.5, 3.0, 4.0 e 5.0 mm), submetidas ao processo de soldagem a Plasma (Micromelt EDG, São Carlos, SP, Brasil), por meio de ensaio de resistência à tração. Foram confeccionados 25 corpos de prova em formato de halteres, separados em 5 grupos (n= 5): Grupo Controle com diâmetro de 3.0 mm, constituídos por barras intactas da liga sem solda; Grupo PL2.5, PL3, PL4 e PL5 com diâmetro de 2.5, 3.0, 4.0 e 5.0mm, respectivamente, usinados em suas metades para posteriormente receberem solda. Os espécimes foram posicionados em um dispositivo para padronização do processo de soldagem. O processo de soldagem a plasma foi executado com profundidade de 10mms e pulso de 3A. Em seguida, foram submetidos ao ensaio de resistência à tração até a ruptura em máquina servohidráulica MTS® 810 (Material Test System Corporation, Minneapolis, Minesota, EUA) com velocidade de 0,02mm/min. Após o ensaio, as amostras foram analisadas em lupa estereoscópica, sendo as áreas soldadas calculadas para avaliação da penetração da solda em programa Motic Images Plus 2.0ML (Motic China Group CO. LTDA). Os resultados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) e teste de Tukey para comparação de médias ( $p \leq 0,05$ ). Para análise de penetração o incremento no diâmetro das amostras afetou a porcentagem de penetração da solda de maneira decrescente. PL2.5 e PL3 apresentaram os maiores valores de tensão máxima ao teste tração, sendo os grupos PL4 e PL5 com maior diâmetro da barra apresentando os menores valores de tensão. Assim a ampliação do diâmetro não resultou em aumento da resistência de união para região soldada.

**Palavras chaves:** Soldagem Plasma, Liga de titânio, Resistência à tração.

## ABSTRACT

This study aimed to evaluate the mechanical behavior of the Ti-6Al-4V alloy in different diameters submitted to the process of plasma welding (Micromelt EDG, São Carlos, SP, Brazil), through tensile testing. Twenty-five dumbbell rods ( $n=5$ ) with central diameters of 2.5, 3, 4 and 5 mm were created and was divided in 5 groups: Control group with 3 mm diameter, constituted by intact bars without welding and PL2.5, PL3, PL4 and PL5 groups with 2.5, 3, 4 and 5 mm diameters, respectively machined into halves. The specimens were placed in a device designed to standardize them during the welding process. Plasma welding was executed using pulse of 10(mms) and depth of 3(A). The specimens were tested for tensile strength until fracture using a servohydraulic machine MTS® 810 (Material Test System Corporation, Minneapolis, Minnesota, USA) with a speed of 0.02 mm/min. After the test, the samples were analyzed using a stereomicroscope and the welded areas were calculated to evaluate the weld penetration in Motic Images Plus 2.0 ml program (Motic China Group CO. LTD.) The results were evaluated by analysis of variance (ANOVA) ( $p<0.05$ ) and subsequently using the Tukey test to compare means ( $\alpha= 0.05$ ). For penetration analysis, the enlargement in the diameter of the samples affected the percentage of weld penetration in a decreasing order. PL2.5 and PL3 showed the highest values of maximum stress to the tensile test, and PL4 and PL5 groups that has larger diameter of the bar showed the lowest values. Thus the enlargement of the diameter did not result in increased bond strength for the welded region.

**Keywords:** Plasma welding, Titanium alloy, Tensile strength.

## 1- INTRODUÇÃO

Atualmente, os implantes osseointegrados apresentam-se como uma importante alternativa de reabilitação em diversas situações clínicas. Entretanto ainda existem muitas dúvidas quanto às razões que levam às falhas, sendo que as falhas tardias parecem estar relacionadas principalmente às complicações biomecânicas (Becker et al. 2000, Abduo et al. 2010).

Sabe-se que um dos fatores primordiais para a longevidade da reabilitação com próteses fixas é a adaptação da infra-estrutura aos pilares (Sahin & Çehreli, 2001; Tahmaseb et al. 2010), principalmente em próteses sobre implante, devido à ausência de ligamento periodontal, que compensaria possíveis desajustes (Chai & Chou, 1998; Mansano, 2007). Toda carga incidida sobre um sistema protético não adaptado corretamente pode resultar em complicações mecânicas como desaperto ou fratura de parafusos, fratura de componentes, do próprio implante (Kallus & Bessing, 1994; Neves et al., 2005), complicações biológicas como mucosites, peri-implantites, perda óssea marginal e perda da osseointegração (Gross et al., 1999; Lang et al., 2000).

O problema em obter um ajuste passivo está relacionado aos vários passos envolvidos na confecção de uma prótese sobre implante (Abduo et al. 2010), pois os procedimentos clínicos e laboratoriais, mesmo quando realizados de forma criteriosa, invariavelmente geram distorções na peça finalizada. Os fatores que contribuem para a ocorrência destas distorções incluem: técnica e material de moldagem, obtenção do modelo de gesso, confecção do padrão de cera, procedimentos de fundição, aplicação de porcelana ou resina acrílica sobre a infra-estrutura, além da entrega final da prótese, momento no qual o profissional deve avaliar dentro das limitações impostas a um procedimento clínico, a qualidade do assentamento obtido (Wee et al., 1999).

Com o objetivo de minimizar a ocorrência de distorções, os profissionais têm à sua disposição técnicas que permitem corrigi-las, como por exemplo, soldagem a laser, eletroerosão, soldagem da infra-estrutura fundida a um intermediário protético, cimentação dos componentes à infra-estrutura no momento da instalação das próteses, verificação da compatibilidade dimensional entre modelo mestre e situação clínica real (Wee et al., 1999; Simamoto Júnior, 2008).

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 na solução de problemas de adaptação. A técnica de soldagem apresenta a

vantagem de se trabalhar com segmentos da prótese, os quais permitem, além da melhor adaptação, a distribuição uniforme das tensões, minimizando traumas ou falhas no osso, no implante ou na prótese (Tiozzi R et al. 2010).

Além disso, o advento da Implantodontia trouxe consigo ampla utilização do titânio comercialmente puro (Ti cp) e, suas ligas de uso odontológico (Ti6Al4V - Titânio-Alumínio-Vanádio) também em prótese dentária, por apresentar biocompatibilidade (Faria, 2005; Özen et al., 2005; Cardoso, 2007), resistência e módulo de elasticidade favoráveis (Cardoso, 2007). Contudo, sua alta temperatura de fusão, próxima de 17000° C, exige procedimentos especiais de fundição, ciclos de resfriamento, revestimentos e equipamentos para prevenir sua contaminação. Sendo assim o uso de barras pré-fabricadas restringe distorções a pequena região de solda. O titânio é altamente reativo em altas temperaturas, tendo grande afinidade por hidrogênio, nitrogênio e oxigênio, os quais podem ser responsáveis por torná-lo mais frágil, daí a necessidade de proteção por gás inerte durante seu processamento (Bergman 1990, Craig et al., 1997; Alves et al., 2003; Anusavice, 2005).

Dessa forma, houve grande necessidade de introduzir no mercado, técnicas mais apuradas de soldagem voltadas para Odontologia, dentre as quais destacam-se novas possibilidades de solda como o LASER (Ligth Amplification by Stimulated Emission of Radiation) e soldagem a arco, com destaque para os métodos TIG (Tungsten Inert Gas) e Plasma, que produzem soldas de qualidade superior à obtida por brasagem a maçarico em ligas como Co-Cr, Ni-Cr e, especificamente, Ti e suas ligas, além de gerarem pouca distorção na peça a ser soldada (Hart & Wilson, 2006; Silva, 2007; Cardoso, 2007).

Atualmente a solda 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). Apresenta vantagens como realização de soldas em lugares de difícil acesso, soldagem diretamente no modelo, pode ser realizada com ou sem a adição de material dependendo da proximidade das partes a serem soldadas, pode ser realizada em proximidade de áreas recobertas por cerâmica ou resina. No entanto, entre as desvantagens estão: limitação quanto à profundidade de solda, sustentação manual da peça (ou do modelo com a peça a ser soldada) durante o procedimento de soldagem que pode ser encarada como prejudicial sob o ponto de vista de focalização adequada do feixe, e alto custo do equipamento.

As soldagens TIG (Tungsten Inert Gas) e Plasma (Plasma Arc Wedding – PAW) consistem em um processo que utiliza como fonte térmica um arco elétrico formado

entre um eletrodo de tungstênio e a peça a ser soldada, com proteção local de gás inerte, geralmente um fluxo de argônio, para prevenção de oxidação/inclusões, podendo ser utilizado metal de adição ou não (Marques, 1991; Silva, 2007; Cardoso, 2007). Podem ser apontadas como desvantagem, maior produção de calor que resulta em maior zona afetada pelo calor (ZAC), potencializando a possibilidade de distorções na peça. (Cardoso, 2007).

O processo de soldagem a arco Plasma difere do processo TIG principalmente pelo fato de o arco estar restringido por um bocal constritor que limita seu diâmetro e aumenta consideravelmente a intensidade da fonte de calor. (Cary, 1998; Marques, 2007; Silva, 2007).

Assim sendo, este trabalho teve por objetivo avaliar, por meio do ensaio mecânico de resistência à tração, as propriedades mecânicas de barras de liga de titânio (Ti-6Al-4V) soldadas em diferentes diâmetros pela solda Plasma.

## 2- MATERIAL E METÓDO

Foram confeccionados 25 corpos de prova em liga de titânio (Ti6Al4V), divididos em cinco grupos (n=5), de acordo com a tabela 1.

Tabela 1: Grupos estudados.

<b>Grupo</b>	<b>Diâmetro</b>	<b>Pulso</b> <b>(A)</b>	<b>Profundidade</b> <b>(mms)</b>
<b>Controle</b>	3,0	-	-
<b>PL2.5</b>	2,5	3	10
<b>PL3</b>	3,0	3	10
<b>PL4</b>	4,0	3	10
<b>PL5</b>	5,0	3	10

### *Confeção dos corpos de prova*

Os corpos de prova foram obtidos a partir da usinagem de barras pré-fabricadas de liga de titânio (Ti6Al4V) com 10mm de diâmetro (Realum, Indústria e Comércio de Metais Puros e Ligas LTDA, São Paulo, Brasil), cujas informações estão no Quadro 1, em forma de halteres, sendo suas dimensões obtidas a partir da norma ASTM E 8/E 8M

– 08 como demonstrado na figura 1. Os grupos experimentais foram usinados em metades e as amostras do grupo controle foram usinadas intactas (Figura 2 a e b, c).

Quadro 1: Composição da liga de titânio (Ti-Al-4V).

<b>ASTM F136 6 AL-4V ELI</b>		
	Min.	Max.
<b>N</b>	-	0,05
<b>C</b>	-	0,08
<b>H</b>	-	0,0125
<b>Fe</b>	-	0,25
<b>O2</b>	-	0,13
<b>Al</b>	5,5	6,50
<b>V</b>	3,5	4,50
<b>Ti</b>	.	Bal.

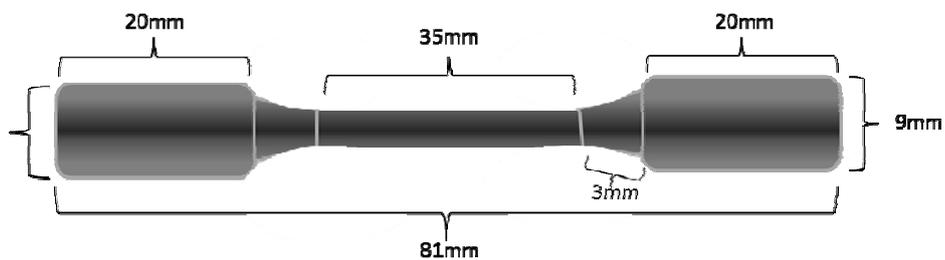


Figura 1: Dimensões do corpo de prova.



Figura 2: a e b) Usinagem dos corpos de prova; c) Metades dos corpos de prova.

Após a usinagem, os corpos de prova foram enumerados, com broca esférica acoplada a peça reta em baixa rotação, nas extremidades para facilitar sua identificação.

Estes foram colocados em aparelho de ultrassom com álcool 99,5° GL (EMFAL LTDA, Betim, MG, Brasil) por 10 minutos para limpeza da superfície (Wang e Welsch, 1995) e adequadamente secos para que o processo de soldagem pudesse ser realizado.

### *Soldagem*

As metades dos corpos de prova dos grupos experimentais foram unidos por meio de dispositivo confeccionado no Laboratório de Projetos Mecânicos (LPM) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, que permite a padronização da posição de soldagem para os grupos experimentais (Cardoso, 2007; Cavalcante et al. 2009) (Figura 3b).

A máquina de solda Plasma (Micromelt EDG, São Carlos, SP, Brasil) (Figura 3a) foi regulada para trabalhar com pulso de 3A e profundidade de 10mms, de acordo com valores obtidos em estudo prévio que demonstrou serem estes parâmetros, os melhores para soldagem de infra-estruturas em titânio (Cavalcante et al. 2009). Para tanto, o aparelho foi montado com um eletrodo de tungstênio (EDG, São Carlos, SP, Brasil) devidamente afiado em formato de ponta de lápis e centralizado no interior de um bocal cerâmico, por onde se dava a vazão de gás argônio grau 4,5 (99,995% de pureza) (Ueno et al., 2001). Uma garra de aterramento era colocada em contato com a peça durante todo o processo de soldagem. O eletrodo era posicionado perpendicularmente à peça a ser soldada de maneira que a encostasse sem pressioná-la. O comando do pedal era então acionado, liberando o fluxo de argônio para formar uma região livre de oxigênio, e quando liberado acionava o plasma que realizava a soldagem. A vazão de argônio ainda permanecia por alguns segundos (Silva, 2007). Para que a soldagem fosse completa em torno de toda a área a ser soldada, inicialmente foram feitos dois pontos diametralmente opostos de solda para estabilização da peça. Em seguida, a estrutura foi removida da matriz (Figura 3b) para possibilitar a soldagem de toda a circunferência (Figura 3c) (Ueno, 2001; Silva, 2007; Cavalcante et al. 2009).

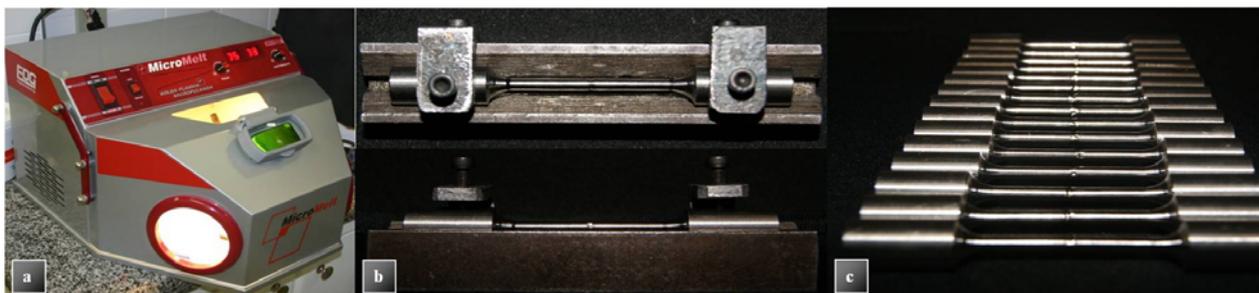


Figura 3: a) Aparelho de solda Plasma; b) Matriz para a padronização da posição de soldagem; c) Aspecto final.

### *Ensaio Mecânico*

O ensaio de resistência à tração foi realizado em máquina de ensaio mecânico MTS® 810 (Material Test System Corporation, Minneapolis, Minnesota, EUA) (Figura 4), lotada no Laboratório de Projetos Mecânicos (LPM) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (FEMEC / UFU) e célula de carga de 2.500 KGF, com velocidade de 0,02mm/min (Figura 4).

O computador acoplado à célula de carga foi programado para registrar as forças (N) exercidas durante a tração dos corpos de prova, representado na Figura 5a. O ensaio foi considerado finalizado com a ruptura dos corpos de prova, sendo registrados nesse momento os valores de força máxima (N) e deslocamento (mm), em que o próprio programa forneceu o gráfico de força-deslocamento, calculados automaticamente pelo software (Figura 5b).



Figura 4: MTS® 810

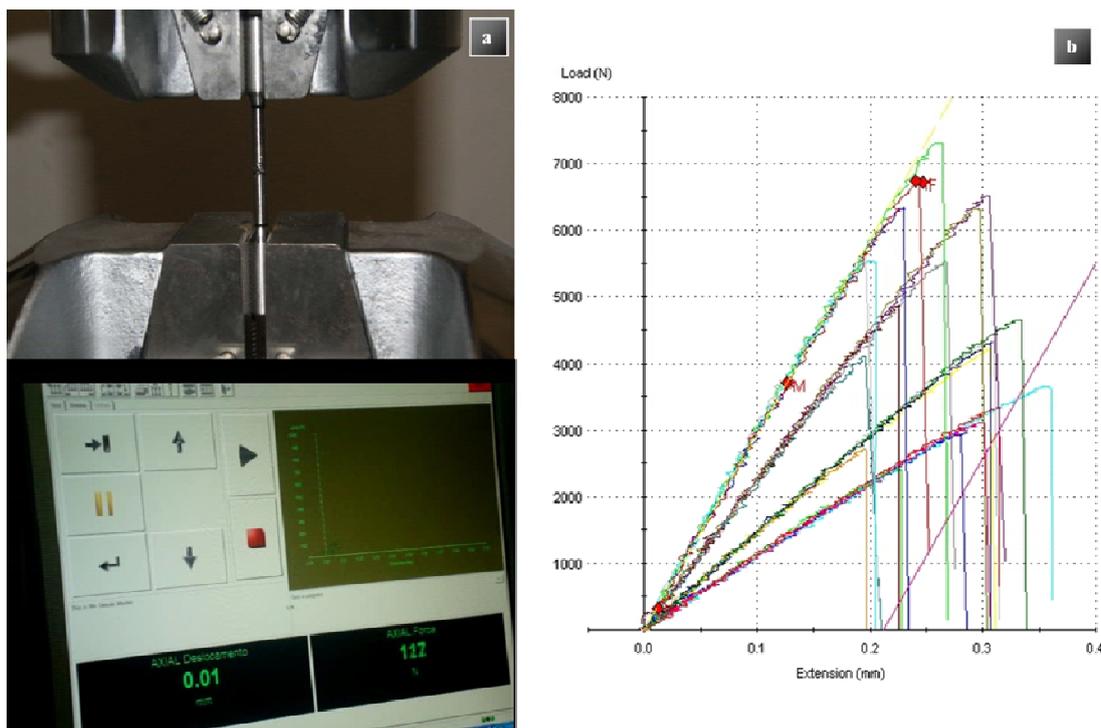


Figura 5: a) Computador acoplado à célula de carga; b) Gráfico força x deslocamento.

Obteve-se o percentual de alongamento por meio do paquímetro digital (Digimatic 700-113 – Mitutoyo Corporation – Japão), 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: sendo que  $L_0$  representa o comprimento inicial antes do ensaio e  $L_f$  representa o comprimento final após o ensaio. Para achar o percentual multiplica-se o resultado por 100.

$$A = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (1)$$

Fórmula 1 – Fórmula do percentual de alongamento,  $A$  = área de penetração;  $L_f$  = Comprimento final;  $L_0$  = Comprimento inicial.

Após o ensaio de resistência à tração, as amostras foram submetidas à avaliação de penetração da solda na região da fratura, por meio de lupa estereoscópica (Leica MS5, Leica Microscopy Systems Ltd. Heerbrugg - Suíça) (Figura 6a), no Laboratório Integrado de Pesquisa Odontológica (LIPO) da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia, com iluminação externa, sob aumento de 2,5 vezes para os diâmetros 2,5 e 3,0 mm e aumento de 1,6 vezes para os diâmetros 4,0 e 5,0 mm.

As imagens capturadas foram analisadas no software Motic Images Plus 2.0ML for Windows (Motic instruments, INC, Richmond, Canadá) onde foram feitas as medições das áreas de penetração da solda (Figura 6b). A medida da área da secção das amostras foi subtraída pela área não soldada, o resultado foi submetido à análise estatística por meio de software SPSS 15.0 for Windows (SPSS Inc, Chicago EUA).

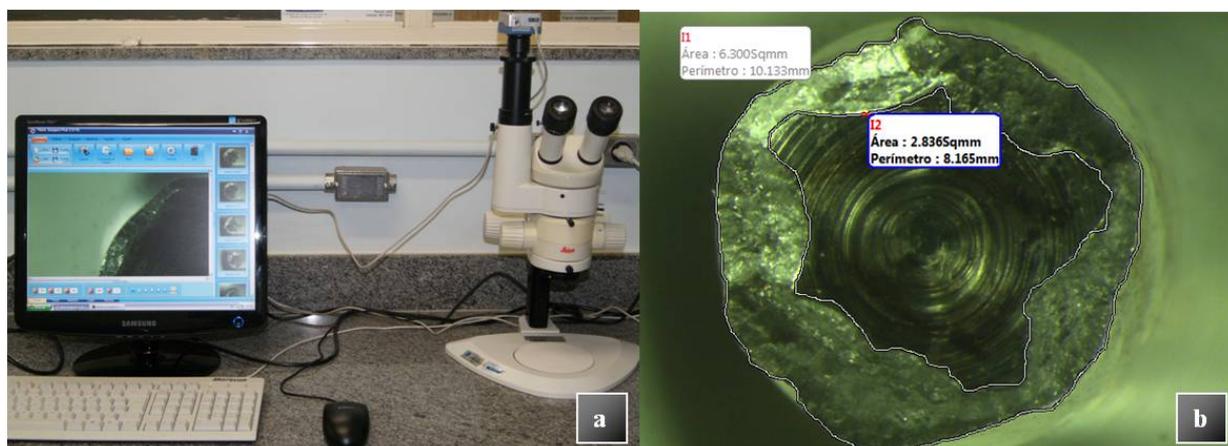


Figura 6: a) Lupa estereoscópica (Leica MS5, Leica Microscopy Systems Ltd. Heerbrugg - Switzerland); b) Imagem gerada pela lupa estereoscópica, medida no software “Motic Images Plus 2.0ML for Windows”.

#### *Análise estatística*

Os resultados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) com índice de significância de ( $p < 0,05$ ) sendo posteriormente aplicado o teste Tukey para comparação de médias ( $p = 0,05$ ) por meio de software SPSS 15.0 for Windows (SPSS Inc, Chicago EUA).

### **3- RESULTADOS**

Foram obtidos resultados para os parâmetros: tensão máxima, área de penetração e alongamento. As médias e desvio padrão para tensão máxima foram obtidos a partir dos valores fornecidos pela máquina no ensaio de resistência à tração. Esses valores encontram-se descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Comparação de médias de tensão máxima (MPa) dentro do fator diâmetro.

<b>Controle</b>	<b>PL2,5</b>	<b>PL3</b>	<b>PL4</b>	<b>PL5</b>
-----------------	--------------	------------	------------	------------

<b>Média</b>	<b>1008,46<sup>A</sup></b>	<b>627,32<sup>B</sup></b>	<b>571,54<sup>BC</sup></b>	<b>434,82<sup>CD</sup></b>	<b>320,6<sup>D</sup></b>
<b>D. Padrão</b>	<b>37,1</b>	<b>94,18</b>	<b>108,64</b>	<b>79,64</b>	<b>38,68</b>

Em relação ao alongamento, a Tabela 2 apresenta a comparação entre os valores reais, médias de cada grupo e percentual de alongamento, após o processo de soldagem e ensaio de resistência à tração.

Tabela 2: Comparação de médias de alongamento (mm) dentro do fator diâmetro.

	<b>Controle</b>	<b>PL2,5</b>	<b>PL3</b>	<b>PL4</b>	<b>PL5</b>
<b>Média</b>	<b>2,62</b>	<b>0,56</b>	<b>0,504</b>	<b>0,132</b>	<b>0,568</b>
<b>Percentual</b>	<b>7,48%</b>	<b>1,6%</b>	<b>1,44%</b>	<b>0,37%</b>	<b>1,62%</b>

Em relação à área de penetração, a tabela 3 apresenta médias e desvio padrão de área soldada e porcentagem de área soldada. Como os corpos de prova sofreram completa ruptura estes foram enumerados como 1, 1a, 2, 2a e assim por diante.

Tabela 3: Comparação dos valores de área soldada e porcentagem, suas médias e desvio padrão.

<b>Grupo</b>	<b>2,5</b>		<b>3,0</b>		<b>4,0</b>		<b>5,0</b>					
	<b>Área Solda</b>	<b>%</b>	<b>Área Solda</b>	<b>%</b>	<b>Área Solda</b>	<b>%</b>	<b>Área Solda</b>	<b>%</b>				
	<b>Média</b>	<b>2,35<sup>A</sup></b>	<b>47</b>	<b>Média</b>	<b>3,09<sup>A</sup></b>	<b>43</b>	<b>Média</b>	<b>4,6<sup>B</sup></b>	<b>36</b>	<b>Média</b>	<b>5,22<sup>C</sup></b>	<b>26</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,09</b>	<b>1,86</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,17</b>	<b>2,46</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,74</b>	<b>6,06</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,37</b>	<b>1,9</b>

As figuras 7 à 10 apresentam as imagens obtidas em lupa estereoscópica da secção transversal das amostras após o ensaio de tração.

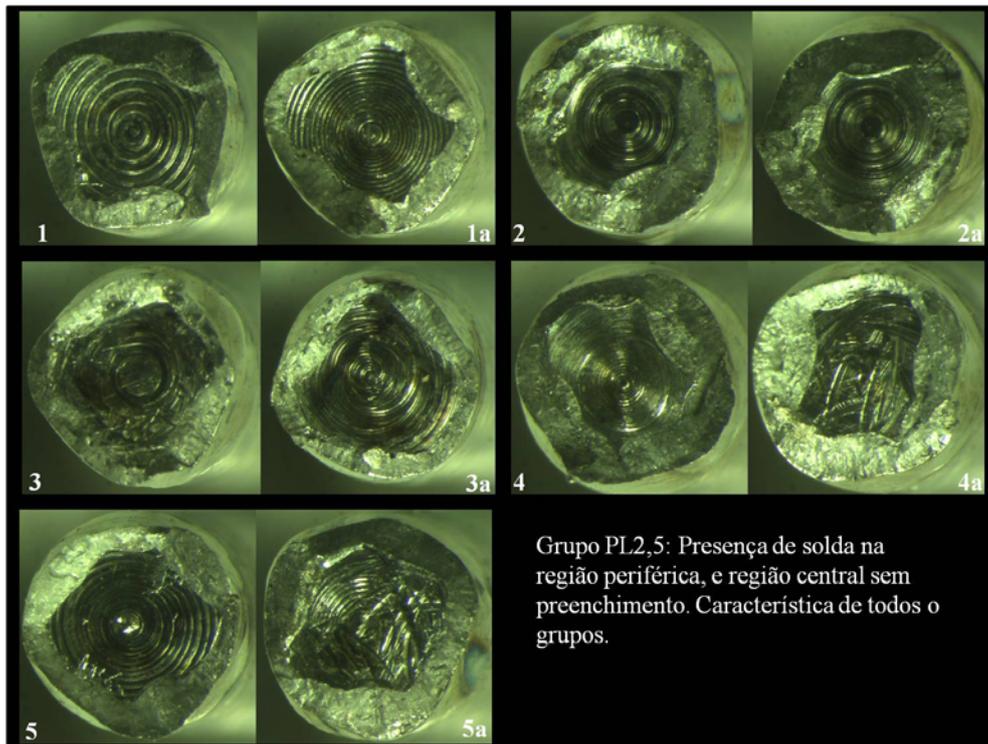


Figura 7 – Imagens obtidas por meio de lupa estereoscópica, caracterizando a penetração da solda após o teste de tração para os corpos de prova do grupo PL2,5.

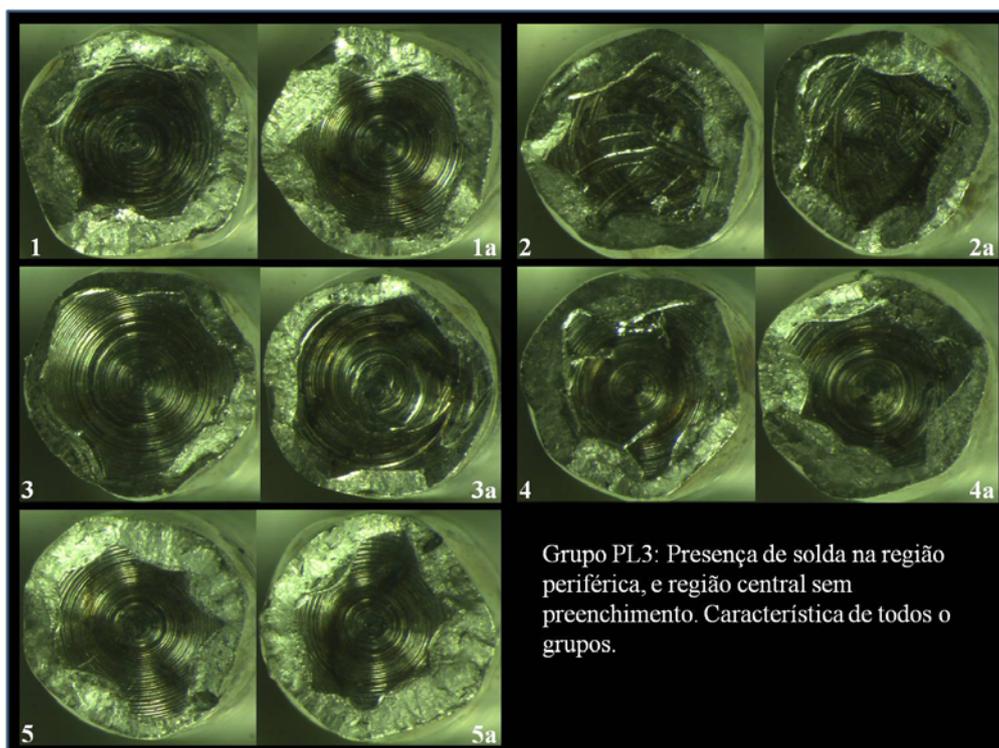


Figura 8 – Imagens obtidas por meio de lupa estereoscópica, caracterizando a penetração da solda após o teste de tração para os corpos de prova do grupo PL3.

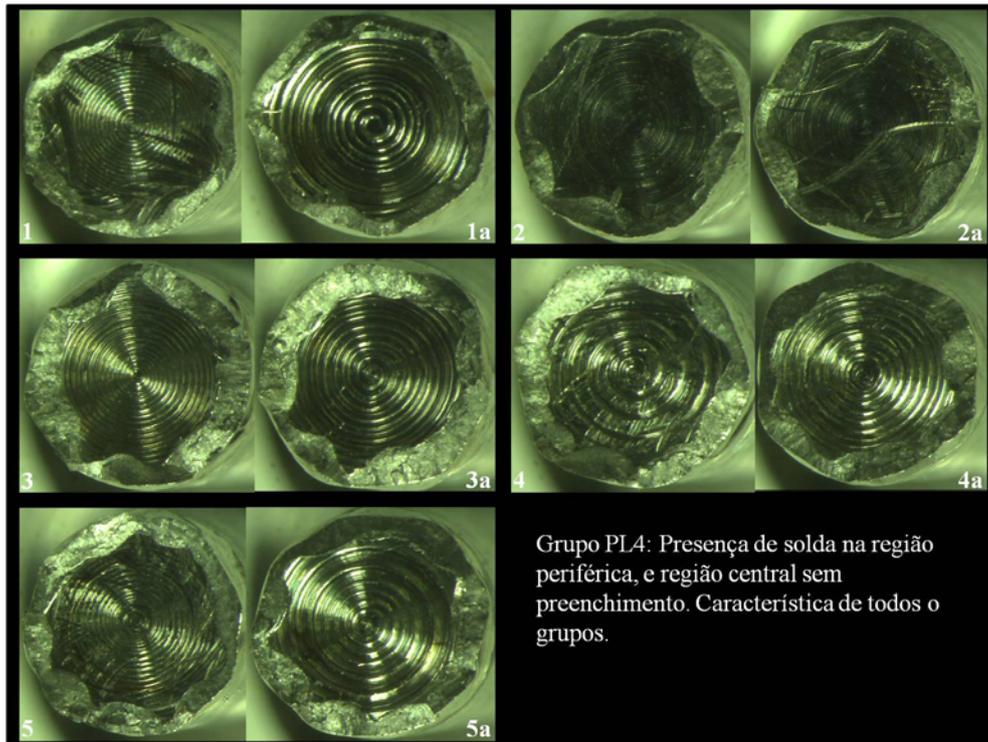


Figura 9 – Imagens obtidas por meio de lupa estereoscópica, caracterizando a penetração da solda após o teste de tração para os corpos de prova do grupo PL4.

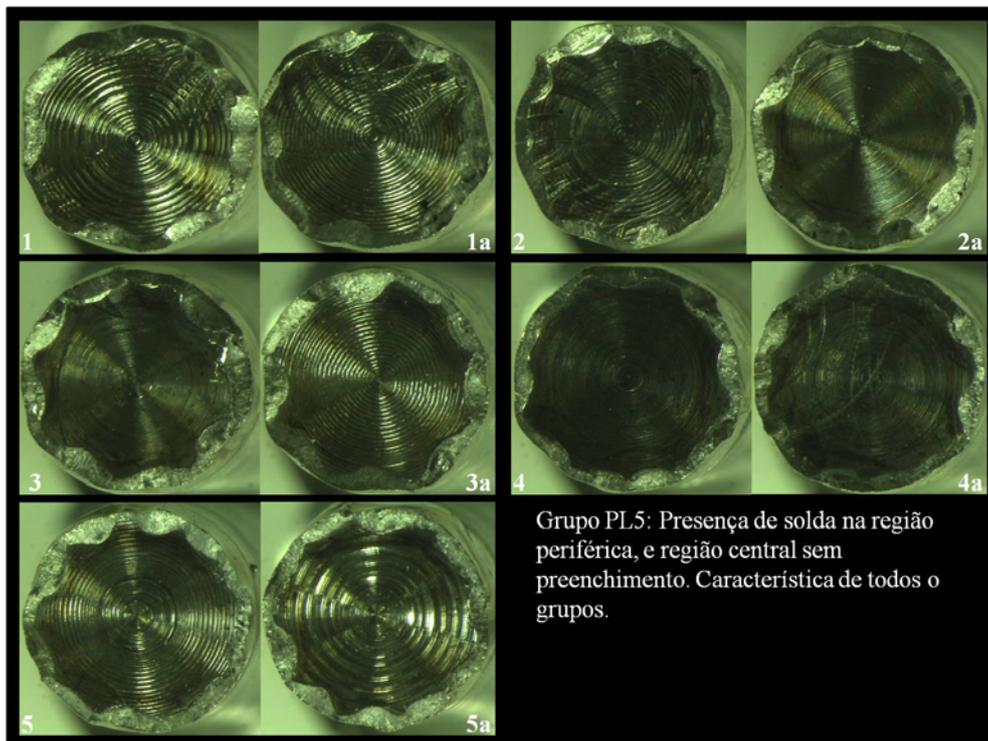


Figura 10 – Imagens obtidas por meio de lupa estereoscópica, caracterizando a penetração da solda após o teste de tração para os corpos de prova do grupo PL5.

## 5- DISCUSSÃO

Os resultados mostraram que os valores de tensão máxima foram maiores para o grupo controle quando comparados aos grupos submetidos à soldagem Plasma, independente do diâmetro das amostras. Vários fatores, consequentes da técnica utilizada, contribuíram para que tais resultados fossem obtidos. Um deles é a 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).

Além disso, as próprias características do titânio (Bergman, 1990; Craig, 1997; Anusavice, 2005) e sua aplicação constante na odontologia reparadora, levou à necessidade de introduzir no mercado, técnicas mais apuradas de soldagem. As máquinas de solda Plasma utilizam o arco elétrico como fonte de calor, por ser a fonte de calor mais utilizada na soldagem por fusão de materiais, pois apresenta características como concentração de energia para fusão do metal na base do material, facilidade de controle, baixo custo relativo do equipamento e um nível aceitável de riscos a saúde dos operadores (Cary, 1998).

A aquisição do equipamento de Plasma tem custo mais acessível quando comparado ao de solda LASER, o que diminui o valor agregado da reabilitação, e estudos têm demonstrado que é possível soldar o titânio pelo método TIG (Hart & Wilson, 2006; Wang & Welsch, 1995; Rocha et al., 2006; Atoui, 2008) e pelo método de Plasma (Roggensack, 1993) que se apresenta como alternativa de baixo custo e funcionalmente viável (Silva, 2007). A forma da ponta do eletrodo é um item fundamental a ser observado na soldagem a arco e há uma variedade de preparações de acordo com a aplicação.

Outro fator que interfere nos valores de resistência do titânio submetido à técnica de soldagem Plasma é a presença de poros e a penetração insuficiente da solda assim com também é visto com trabalhos utilizando o feixe de LASER (Roggensack et al., 1993; Berg et al. 1995; Zavanelli et al., 2004; Botega 2005). A presença de porosidades existentes na região da união, é devida à inclusão de gás argônio, necessário para manter atmosfera inerte durante o procedimento de soldagem e assim, minimizar a interação com elementos do ar (Botega, 2005).

Entretanto, dentre os determinantes para os resultados obtidos, 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 (Baba & Watanabe, 2005). Neste estudo, pôde-se observar por meio de imagens lupa estereoscópica que em todos os grupos de solda plasma, não preenchem totalmente os espaços internos, fato que pode diminuir a resistência da estrutura soldada. Um dos motivos pode ser o posicionamento da junta do tipo topo (Chai & Chou, 1998), sem espaçamento entre as partes e sem material de adição. Esse é um fato corriqueiro nas soldas por fusão pulsadas. Essa limitação também é vista na solda a LASER (Chai & Chou, 1998) amplamente usada e difundida na odontologia. Quando comparamos as imagens da lupa estereoscópica (Figuras 7, 8, 9 e 10) com os valores de resistência à tração (Tabela 2), notamos que os mais baixos estão relacionados as imagens que apresentam menor penetração.

A localização de metal fundido apenas na periferia da amostra fragiliza a união e a resistência da peça como um todo. Sendo assim, se uma infra-estrutura for soldada em uma região de maior dimensão, pode-se esperar que a solda não tenha alcançado o interior do metal (Botega, 2005). Nesta situação, é importante que o desgaste na região da união durante acabamento e polimento da peça seja o mínimo possível, uma vez que a resistência da mesma é dada pela região onde a solda penetrou, ou seja, a região periférica, e uma redução no diâmetro do metal implicaria em redução na resistência da união (Wang & Welsch, 1995). Uma maneira de aumentar a área interna atingida pela solda seria a realização de desgaste de uma das extremidades, de maneira a formar uma canaleta entre as duas partes, e assim, a aplicação da solda preencheria todo o interior do metal (Botega, 2005).

Quanto à localização da fratura após o ensaio de resistência à tração, esta ocorreu tanto na região da união quanto no metal original nas amostras em todos os diâmetros. O que determina o início da fratura é a presença de defeitos ou fendas que agem como pontos de concentração de tensão (Cetlin et al., 1979; Brick et al., 1965, Botega, 2005). As amostras que, após o procedimento de soldagem, apresentaram alguma imperfeição da união ou, na maioria das vezes, esta região com secção transversal menor que o restante da amostra, resultaram em fratura na união, menor valor de resistência à tração e menor alongamento visto que esta região apresenta menor ductilidade, como no caso de todos os grupos soldados. Na ausência destas condições, como no caso dos corpos de prova intactos, a fratura ocorreu no metal original, com maior valor de alongamento. Quanto ao tipo de fratura, podemos classificá-la como dúctil, caracterizada pela deformação permanente da amostra e estricção na região da fratura (Brick et al., 1965; Sjögren et al., 1988; Anusavice, 2003), observada principalmente nos corpos de prova intactos e em menor escala nos corpos de prova soldados.

Os diferentes diâmetros avaliados neste estudo simulam a aplicação da técnica da solda a Plasma às diferentes condições encontradas na rotina laboratorial. Sendo que se a união soldada apresentar trincas ou entalhes, agindo como pontos de concentração de tensão, ou área interna do metal que não foi atingida pela solda, esta união pode fracassar em um curto período de tempo, sob aplicação de tensão inferior àquela que uma união adequada suportaria (Neo et al., 1996).

Em condições clínicas, incidem forças que não foram simuladas em laboratório neste estudo, assim como forças mastigatórias e outras consequentes de parafunção. Desta forma, algumas das limitações deste estudo podem ser citadas, como a ausência de informação com relação à longevidade do procedimento de soldagem, a partir do ensaio de resistência à fadiga. Além disso, o recobrimento estético representa um fator importante que poderia influenciar na adaptação da infra-estrutura aos pilares. Diante disso, existe a necessidade de realização de estudos longitudinais que avaliem tais condições. Apesar destas limitações, a realização deste estudo pôde fornecer alguns dados na tentativa de esclarecer o comportamento da liga de Ti6Al4V submetido à solda Plasma nestas condições.

## **6- CONCLUSÃO**

- Tanto para o percentual de penetração quanto para os valores de tensão os grupos experimentais PL2.5 e PL3 apresentaram maiores valores quando comparados com os demais grupos experimentais.
- O grupo controle apresentou os maiores valores de tensão máxima que os grupos experimentais.
- O grupo controle apresentou maior percentual de alongamento que os grupos experimentais.

## **7- AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à FAPEMIG (Projeto: SAU19/2009) pelo apoio financeiro necessário à realização desta pesquisa. Ao Laboratório de Projetos Mecânicos “Hener Alberto Gomide”. Laboratório de metalurgia e cerâmica da Escola Técnica de Saúde (ESTES) e ao Laboratório Integrado de Pesquisa Odontológica (LIPO) da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia (FOUFU).

## **8- REFERÊNCIAS**

1. ABDUO J, BENNANI V, WADDELL N, LYONS K, SWAIN M. Assessing the fit of implant fixed prostheses: a critical review. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 25:506-515, 2010.
2. ALVES BP. Análise da adaptação de estruturas de próteses sobre implantes pré-fabricadas ou fundidas em titânio, antes e após a soldagem a laser [tese]. Piracicaba (SP): Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Odontologia de Piracicaba; 2003.
3. ANUSAVICE KJ. Phillips, materiais dentários. 11 ed. Rio de Janeiro: Elsevier; 2005.
4. ANUSAVICE KJ. Phillips's Science of Dental Materials. 11. ed. St. Louis: Saunders; 2003.
5. ATOUI, J. A. Resistência mecânica e desajuste marginal do titânio comercialmente puro submetido a dois métodos de soldagem: TIG e Laser. 155f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Odontologia de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão preto, 2008.

6. BABA N, WATANABE I. Penetration depth into dental casting alloys by Nd:YAG laser. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 2005;72(1):64-8.
7. BECKER CM, KAISER DA, JONES JD. Guidelines for splinting implants. *J Prosthet Dent (St. Louis)*, 84(2):210-4, 2000.
8. BERG, E; WAGNER, W.C; DAVIK, G. DOOTZ, E.R. Mechanical properties of laser-welded cast and wrought titanium. *J Prosthet Dent* 1995;74:250-7.
9. BERGMAN, M. Cast titanium in dental constructions. DPNOVA AB Malmo: Sweden, Aug. 1990. [Manual]
10. BERTRAND C, Le PETITCORPS Y, ALBINGRE L, DUPUIS V. The laser welding technique applied to the non precious dental alloys procedure and results. *Br Dent J.* 2001;190(5):255-7.
11. BLUSTEIN, R. et al. A reliable technique of post soldering of nonprecious ceramic units. *J. Prosth. Dent.*, v.36, n.1, p.112-4, jul. 1976.
12. BOTEGA. DM. Resistência a tração do titânio comercialmente puro soldado a laser em diferentes distâncias a diâmetros Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Odontologia de Piracicaba Nível: Tese (doutorado) Unicamp: Prótese Dental Doutor em Clínica.
13. BRICK RM, GORDON RB, Phillips A. Structure and properties of alloys. 3.ed. McGraw-Hill Book Company, 1965.
14. CARDOSO, L.M. Avaliação da resistência à flexão de liga de titânio submetida a soldagens laser e TIG, visando prótese dentária. 2007. 126p. Dissertação de mestrado, Instituto de pesquisas energéticas e nucleares – lasers em odontologia, São Paulo.
15. CARY, HOWARD B. Modern welding technology. 4<sup>th</sup> ed. Ohio. Prentice Hall, 1998.
16. CAVALCANTE, L.A.L.; FERREIRA,V.R.N.; NEVES, F.D.; FERNANDES NETO, A.J.; ARAÚJO, C.A.; NÓBILO, A.A.; SIMAMOTO JÚNIOR, P.C. Análise da resistência à flexão em braços suspensos de protocolos alternativos sobre implantes utilizando diferentes técnicas de soldagem. *Horizonte Científico*, Vol. 1, n°.10,2010.
17. CETLIN PR, SILVA PSP, PENNA JA. Análises de fraturas. Associação Brasileira de Metais; 1979.
18. CHAI. T.; CHOU, C.K. Mechanical properties of laser-welded cast titanium joints under different conditions. *J Prosthet Dent.* 1998; 79 (4): 477-483.
19. CRAIG, R.G. et al. Restorative dental materials. 10.ed. Saint Louis: Mosby, 1997. Cap.15: Cast and wrought base metal alloys, p.428-432.

20. ELIASSON A, WENNERBERG A, JOHANSSON A, ORTORP A, JEMT T. The precision of fit of milled titanium implant frameworks (I-Bridge) in the edentulous jaw. *Clin Implant Dent Relat Res*, 12(2):81-90, 2010.
21. FARIA, A. C. L. Estudo da Biocompatibilidade de Ligas Metálicas Odontológicas e do Ti cp Obtidos por Fundição. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Odontologia de Ribeirão Preto. 2005
22. HART, C.N.; WILSON, P.R. Evaluation of welded titanium joint used with cantilevered implant-supported prostheses. *J Prosthet Dent*. 2006; 96:25-36.
23. MANSANO, R.A.S. Efeitos de diferentes tipos de soldagem na resistência a tração de estruturas de Ni-Cr. Bauru, SP. 2007. (Mestrado- Área de Reabilitação Oral) Faculdade de Odontologia de Bauru da Universidade de São Paulo.
24. MARQUES, P.V. Tecnologia da soldagem. Belo Horizonte: ESAB, 1991.
25. NEO TK, CHAI J, GILBERT JL, WOZNIAK WT, ENGELMAN MJ. Mechanical properties of titanium connectors. *Int J Prosthodont*. 1996;9(4):379-93. 7.
26. ÖZEN, J.; URAL, A. U.; DALKIZ, M.; BEYDEMIR, B. Influence of Dental Alloys and All-Ceramic Material on Cell Viability and Interleukin-1 Beta Release in a Three-Dimensional Cell Culture Model. *Turkish Journal of Medical Sciences*, n. 35, p. 203-208, 2005.
27. 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.
28. ROGGENSACK M, WALTER MH, BONING KW. Studies on laser- and plasma-welded titanium. *Dent Mater*. 1993;9(2):104-7.
29. SILVA, J. Avaliação da Resistencia 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.
30. SIMAMOTO-JÚNIOR, P.C.; NOVAIS, V.R.; NÓBILO, M.A.A.; BARBOSA, G.A.S.; SOARES, C.J.; NEVES, F.D. Influence of the soldering type in fitting prostheses on implants: a scanning electronic microscopy analysis. *Arquivos em Odontologia*. Belo Horizonte. 44, n. 01, 2008.
31. SJÖGREN G, ANDERSSON M, BERGMAN M. Laser welding of titanium in dentistry. *Acta Odontol Scand*. 1988; 46: 247-253.
32. STEINMAN, R.R. Warpage produced by soldering with dental solders and gold alloys. *J. Prosthet. Dent.*, v.4, n.3, p.384-95, may. 1954.

33. TAHMASEB A, VAN DE WEIJDEN JJ, MERCELIS P, CLERCK RD, WISMEIJER D. Parameters of Passive Fit Using a New Technique to Mill Implant-Supported Superstructures: An In Vitro Study of a Novel Three-Dimensional Force Measurement–Misfit Method. *Int J Oral Maxillofac Implants*;25:247–257, 2010.
34. TAIRA M, MOSER JB, GREENER EH. Studies of Ti alloys for dental castings. *Dent Mater*. 1989;5(1):45-50.
35. TAMBASCO J, ANTHONY T, SANDVEN O. Laser welding in the dental laboratory: an alternative to soldering. *J Dent Technol*. 1996;13(4):23-31.
36. 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.
37. TIOSSI R, FALCÃO-FILHO H, AGUIAR JÚNIOR FA, RODRIGUES RC, M. DA G. MATTOS M DA G & RIBEIRO RF. Modified section method for laser-welding of ill fitting cp Ti and Ni–Cr alloy one-piece cast implant-supported frameworks. *Journal of Oral Rehabilitation*, 37; 359–363, 2010.
38. UENO AH. Análise Comparativa da alteração dimensional entre dois métodos de soldagem: arco elétrico com proteção de argônio (TIG) e maçarico, para uma liga para prótese metalocerâmica à base de Ni-Cr [tese]. Bauru (SP): Faculdade de Odontologia de Bauru. Universidade de São Paulo; 2001.
39. WANG RR, WELSCH GE. Joining titanium materials with tungsten inert gas welding, laser welding, and infrared brazing. *J Prosthet Dent*. 1995;74(5):521-30.
40. WEE, A.G.; AQUILINO, S.A.; SCHNEIDER, R.L. Strategies to achieve fit in implant prosthodontics: a review of the literature. *Int J Prosthodont*. 1999; 12 (2): 167-178.
41. WISKOTT HW, MACHERET F, BUSSY F, BELSER UC. Mechanical and Elemental characterization of solder joints and welds using a gold-palladium alloy. *J Prosthet Dent*. 1997;77(6):607-16.
42. ZAVANELLI RA, GUILHERME AS, PESSANHA-HENRIQUES GE, DE ARRUDA NOBILO MA, MESQUITA MF. Corrosion-fatigue of laser-repaired commercially pure titanium and Ti-6Al-4V alloy under different test environments. *J Oral Rehabil*. 2004;31(10):1029-34.