

## Efeito da soldagem e do diâmetro na resistência à tração de liga de Ti-6Al-4V soldada com solda TIG de uso odontológico

Morgana Guilherme de Castro, Faculdade de Odontologia, Universidade Federal de Uberlândia, [morgana\\_castro3@hotmail.com](mailto:morgana_castro3@hotmail.com)

Mattheus Burgos Santos, Faculdade de Odontologia, Universidade Federal de Uberlândia, [burgos.mattheus@gmail.com](mailto:burgos.mattheus@gmail.com)

Gabriela Lima Menegaz, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, [gabriela.menegaz@gmail.com](mailto:gabriela.menegaz@gmail.com)

Washington Martins Silva Júnior, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, [washington@femec.ufu.br](mailto:washington@femec.ufu.br)

Cleudmar Amaral Araújo, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, [cleudmar@mecanica.ufu.br](mailto:cleudmar@mecanica.ufu.br)

Paulo César Simamoto Júnior, Faculdade de Odontologia, Universidade Federal de Uberlândia, [psimamoto@foufu.ufu.br](mailto:psimamoto@foufu.ufu.br)

**Resumo.** Este estudo avaliou a resistência à tração do Ti-6Al-4V soldado com solda TIG. Foram confeccionadas 45 amostras, divididas em: grupo controle (GC) (n=5), com amostras intactas de 3.0mm e grupos TIG2.5, TIG3, TIG4, TIG5 (n=10) com amostras soldadas nos diâmetros de 2.5, 3, 4 e 5 mm, respectivamente. A soldagem TIG foi realizada com corrente de 3A e tempo de 10 ms. Realizou-se testes de inspeção radiográfica e análise por líquidos penetrantes, teste de tração com cálculo do percentual de alongamento (PE) Foram obtidas imagens das áreas soldadas para calcular o percentual de área soldada (PAS). As imagens foram avaliadas em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Os resultados foram submetidos ao ANOVA e teste Tukey. Modelos de Elementos Finitos foram desenvolvidos em ambiente Workbench e condições de contorno simulando um ensaio de tração. A maioria das amostras apresentou penetração incompleta e fraturou na área de solda, porém não apresentaram porosidades nem ranhuras superficiais. O GC apresentou valores de tensão máxima, estatisticamente semelhantes ao TIG2.5, mas diferente dos demais. Houve diferença estatística entre GC e grupos testes para PE. O grupo TIG2.5 apresentou a maior PAS. Imagens de MEV mostraram a presença de bolhas e fraturas frágeis em meio às fraturas dúcteis. O diâmetro 2.5 mm parece ser a melhor opção para união de barras pré-fabricadas neste tipo de junta e nesta regulagem da máquina.

**Palavras chave:** Ligas dentárias, soldagem em odontologia, resistência à tração.

### 1. INTRODUÇÃO

Assim como na engenharia, a soldagem é usada na odontologia como um método de fabricação e reparação de peças protéticas tanto sobre pilares dentários quanto em pilares de implantes. A técnica mais comumente usada em laboratórios de prótese dentária é a brasagem direta ou soldagem por chama e tem sua aplicação sustentada por anos, devido ao baixo custo e relativa eficácia (AWS, 1992). No entanto técnicas mais modernas têm sido estudadas há algum tempo, como as soldagens a arco - Soldagem plasma (Roggensack et al., 1993; Chai e Chou, 1998; Hart & Wilson, 2006, Lyra e Silva et al. 2012) Soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) (Wang and Welsh, 1995; Neo et al., 1996, Taylor et al., 1998; Hart and Wilson, 2006; Barbi et al., 2012, Piveta et al., 2012) e soldagem Laser (Sjogren et al., 1988; Roggensack et al., 1993; Neo et al., 1996; ;Chai e Chou, 1998, Liu et al., 2002; Zavanelli et al., 2004; Hart and Wilson, 2006; Rocha et al., 2006; Lin et al., 2007; Srimaneepong et al., 2008; Kikuchi et al., 2011; Nuñez-Pantoja et al., 2011, Barbi et al., 2012; Fornaini et al., 2012).

Ambas as técnicas tem vantagens semelhantes e podem ser realizadas no próprio modelo de trabalho, permitem a soldagem em áreas próximas a resina e porcelana (Chai & Chou, 1998; Nuñez-Pantoja et al., 2011; Barbi et al., 2012; Kikuchi et al., 2011; Fornaini et al., 2012, Silveira-Júnior et al. 2012) permitem a soldagem em qualquer posição e necessitam de menos tempo para sua realização, portanto menos tempo do profissional (Silveira-Júnior et al. 2012). Entretanto, o custo do equipamento é uma diferença marcante entre as técnicas, sendo que o custo do equipamento de soldagem TIG e plasma é mais significativamente mais baixo que o equipamento de soldagem laser.

Além disso, há dificuldade na obtenção de uma boa qualidade de solda em ambas as técnicas. Estudos com solda a laser (Sjogren et al., 1988; Roggensack et al., 1993; Neo et al., 1996; ;Chai e Chou, 1998, Liu et al., 2002; Zavanelli et al., 2004; Hart and Wilson, 2006; Lin et al., 2007; Srimaneepong et al., 2008; Kikuchi et al., 2011; Nuñez-Pantoja et al., 2011, Barbi et al., 2012; Fornaini et al., 2012), solda plasma (Roggensack et al., 1993; Chai e Chou, 1998; Hart & Wilson, 2006, Lyra e Silva et al. 2012) e solda TIG (Wag and Welsh, 1995; Neo et al., 1996, Taylor et al., 1998; Hart and Wilson, 2006; Barbi et al., 2012) tem demonstrado que os parâmetros de soldagem (Sjogren et al., 1988, Chai e Chou, 1998, Liu et al 2002, Lin et al 2007, Srimaneepong et al 2008, Lyra e Silva et al 2012) , o diâmetro da infraestrutura (Sjogren et al., 1988 Lin et al. 2007, Nunez-Pantoja et al 2011), a configuração da junta (Nunez-Pantoja et al 2011), o gap de soldagem (Roggensack et al., 1993, Taylor et al., 1998, Nunez-Pantoja et al 2011), o uso de metal de

adição ou (Hart and Wilson 2006) podem influenciar ou não os resultados finais. Entretanto, não há um protocolo de soldagem na literatura científica odontológica que auxilie dentistas e técnicos em próteses dentária para implementação destas técnicas mais modernas.

Estudos recentes têm utilizado a soldagem na fabricação direta de barras de próteses do tipo protocolo de Branemark. Barras pré-fabricadas são soldadas diretamente aos cilindros de titânio, com isso, há redução do tempo total de tratamento, especialmente quando em casos de carga imediata (Hatano et al. 2012). No entanto, como as condições de soldagem para diferentes tipos de metais não são completamente compreendidos (Chai and Chou, 1998; Kikuchi et al., 2011; Nuñez-Pantoja et al., 2011), são necessários mais estudos para que essas técnicas possam ser usadas com segurança.

Assim sendo, o objetivo deste trabalho foi avaliar a resistência de barras pré-fabricadas de liga de Ti-6Al-4V submetida à técnica de soldagem TIG em diferentes diâmetros. Duas hipóteses foram levantadas: as infraestruturas soldadas terão valores de resistência semelhantes aos das infraestruturas intactas e o aumento do diâmetro influenciará positivamente nos valores de resistência.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Quarenta e cinco amostras em formato de alteres (figura 1) foram usinadas e divididas em cinco grupos conforme Tab (1): Grupo Controle (GC) com diâmetro de 3.0 mm, constituídos por barras intactas da liga sem solda (n=5); Grupos TIG2.5, TIG 3, TIG 4 e TIG 5 com diâmetro de 2.5 mm, 3.0 mm, 4.0 mm e 5.0 mm, respectivamente, e soldadas com solda TIG (n=10).

Tabela 1: grupos estudados

Grupo	Número de Amostras	Diâmetro	Pulso (A)	Profundidade (m/s)
Controle	5	3.0	-	-
TIG2,5	10	2.5	3	10
TIG3	10	3.0	3	10
TIG4	10	4.0	3	10
TIG5	10	5.0	3	10

### 2.1. Avaliação mecânica

As amostras foram colocadas em um dispositivo de padronização para serem soldadas. A soldagem TIG foi realizada com uma corrente de 5A e tempo de 3ms. Após a soldagem, as amostras foram submetidas aos ensaios não destrutivos de inspeção radiográfica e teste por líquidos penetrantes para avaliar falhas e/ou descontinuidades internas e externas, respectivamente. Em seguida foram submetidas ao ensaio de tração em máquina de ensaio MTS 810 com célula de carga de 2.500 KGF e velocidade de 0.02mm/min. Foi calculado o percentual de alongamento subtraindo-se o comprimento inicial do comprimento final e dividindo-se o resultado pelo comprimento inicial. Após o ensaio as amostras foram fotografadas com máquina digital a uma distância padronizada e calibrada com função macro e automático e as áreas soldadas foram calculadas no software Motic Images Plus 2.0 que posteriormente foram convertidas em porcentagem de área soldada para efeito de comparação entre os diferentes diâmetros.. Em seguida segmentos representativos de cada grupo foram aleatoriamente levados ao microscópio eletrônico de varredura (MEV).

### 2.2. Método de Elementos Finitos

A amostra de 3mm de diâmetro foi utilizada para referenciar na determinação do modelo de análise. Os desenhos das amostras intactas foram confeccionados o mais próximo do desenho real e os desenhos das amostras soldadas foram confeccionados em três partes, sendo a parte central com menor diâmetro obtido pelos valores das áreas soldadas. Foi feito a metalografia e as medidas, em microdurâmetro, dos tamanhos de zona afetada pelo calor e zona soldada para caracterização dos modelos 3D de elementos finitos soldados, conforme Tab (2).

Tabela 2. Valores (mm) dos tamanhos da zona afetada pelo calor e zona de solda

Região	ZAC 3.0 mm	Solda 3.0 mm
Média	0,9 ± 0,2	3,6 ± 0,2

Modelos aproximados de EF foram desenvolvidos em ambiente Workbench com condições de contorno simulando um ensaio de tração. Os valores da força aplicados no ensaio de resistência à tração dos corpos de prova intactos foram utilizados como referência para simulação computacional. Os valores de deslocamento no eixo Z e tensão principal máxima dos modelos numéricos foram então comparados com os valores de deslocamento e tensão experimentais. Foi feita a validação do modelo por meio da amostra intacta, conforme Fig. (1).

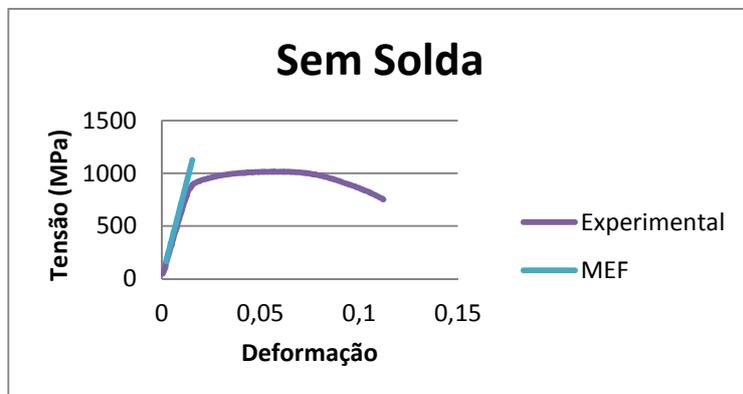


Figura 1. Gráfico Tensão x deformação para amostra intacta

### 3. RESULTADOS

A inspeção radiográfica revelou que na maioria dos corpos de prova do grupo TIG2,5, não havia a presença de defeitos na junta soldada. Já nos demais grupos examinados (TIG3, TIG4 e TIG5) foi possível identificar a presença de defeitos no interior da junta soldada. Quanto ao acabamento superficial em nenhum dos grupos foi observado descontinuidades superficiais após o ensaio por líquidos penetrantes.

Para a tensão máxima observou-se que o grupo controle e o grupo de TIG2,5, foram estatisticamente semelhantes e apresentaram os maiores valores e os grupos TIG4e TIG5 apresentaram os menores valores e foram semelhantes entre si, conforme Tab. (3). Para a porcentagem de alongamento, o grupo controle foi superior ao grupo TIG2,5, sendo este superior aos demais grupos (TIG3, TIG4 e TIG5), sendo estes estatisticamente semelhantes entre si, conforme Tab (3).

Para o calculo da porcentagem de área soldada, as amostras foram previamente numeradas nas secções a e b e todas as amostras sofreram completa ruptura, os valores foram descritos em 1a, 1b, 2a, 2b e assim por diante. As amostras que fraturaram fora da área de solda, foi considerada toda a área da secção transversal soldada. Houve diferença estatística significativa entre os grupos. O grupo TIG2.5 apresentou os maiores valores e os menores valores foram encontrados nos grupos TIG4 e TIG5, sendo estes estatisticamente semelhantes entre si, conforme Tab (3).

Tabela 3. Médias e desvio-padrão de Tensão Máxima (Mpa), percentual de alongamento e porcentagem de área soldada

Grupo	Tensão máxima (MPa)	Percentual de alongamento (%)	Porcentagem de área soldada (%)
Controle	1008,5 ±24,8 <sup>A</sup>	7,48 ±0,8 <sup>A</sup>	-
TIG2.5	990,7 ±130,5 <sup>A</sup>	1,39 ±0,7 <sup>B</sup>	87.6 ±15.9 <sup>A</sup>
TIG3	640,8 ±86,9 <sup>B</sup>	0,35 ±0,1 <sup>C</sup>	49.2 ±5.9 <sup>B</sup>
TIG4	400,9 ±75,5 <sup>C</sup>	0,32 ±0,2 <sup>C</sup>	35.5 ±8.3 <sup>C</sup>
TIG5	381,2 ± 78,4 <sup>C</sup>	0,39 ±0,3 <sup>C</sup>	34.6 ±6.3 <sup>C</sup>

\*Letras iguais numa mesma coluna representa que não houve diferença estatisticamente significativa. Letras diferentes significam diferença estatisticamente significativa.

As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostraram que os corpos de prova, do grupo TIG 2.5, que romperam na região do metal base apresentam superfície de fratura irregular, com ondulações superficiais (dimples) Fig. (2A) e em forma de colmeia provenientes de deformação plástica, sendo estas características de uma fratura dúctil. Já as demais amostras apresentam além das características dúcteis, indicadas pelo círculo azul, regiões planas e com aspecto regular características de fraturas frágeis, indicadas pelo círculo vermelho Fig (2B). Percebe-se em um maior aumento que a superfície destes corpos de prova não foi completamente soldada Fig (2C). Estas amostras evidenciam também porosidades e bolhas na região soldada, apontada pela seta vermelha Fig (2D).

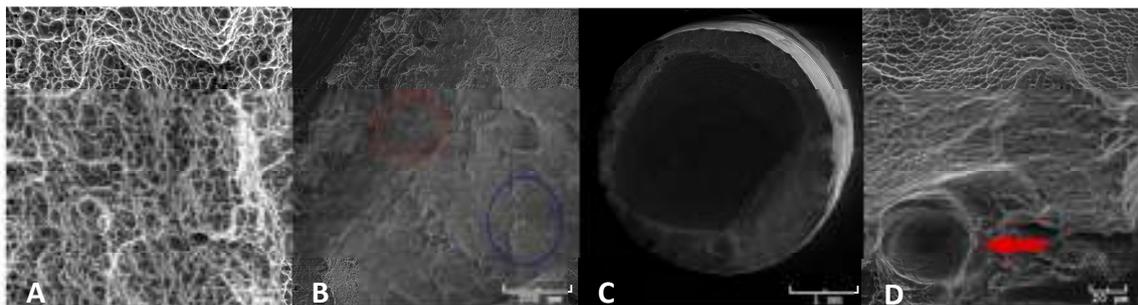


Figura 2. Microscopia eletrônica de varredura

Os modelos obtidos pelo método de elementos finitos mostraram que houve deslocamento ao longo de todo o corpo de prova tanto para os corpos de prova intactos quanto para os soldados e que houve uma concentração de tensão ao longo de toda a parte central do corpo de prova, evidenciando que a ruptura deste poderia acontecer em qualquer ponto desta região também em ambos.

Em relação ao modelo obtido para amostra soldada é possível perceber no gráfico tensão x deformação que as curvas do grupo experimental e as do modelo de EF estão bem próximas, mostrando que o modelo de EF soldado é representativo da condição experimental, conforme Fig (3).

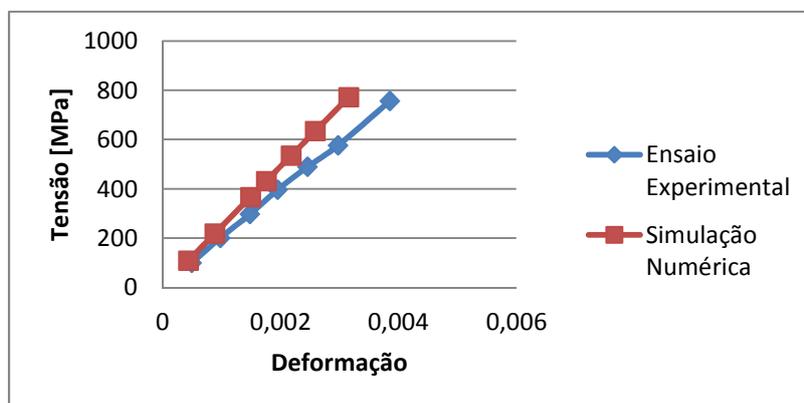


Figura 3. Gráfico Tensão x deformação para amostra soldada

#### 4. CONCLUSÃO

Dentro das limitações desse estudo *in vitro* foi possível concluir que, o grupo TIG 2.5 apresentou resultados semelhantes ao do grupo controle, assim o diâmetro 2.5 mm parece ser a melhor opção para união de barras pré-fabricadas neste tipo de junta e nesta regulagem da máquina.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Barbi, f.c.l.; camarini, e.t.; silva, r. S., endo, e.h.; pereira, j.r. comparative analysis of different joining techniques to improve the passive fit of cobalt-chromium superstructures. *The journal of prosthetic dentistry*. V. 108, p. 376-385, 2012.
- Castro, m.g. avaliação da resistência mecânica de liga ti-6al-4v soldada com processos laser e plasma de uso odontológico. Universidade federal de uberlândia. Faculdade de odontologia. Dissertação de mestrado. 2012.
- Chai, T. & Chou C.K. mechanical properties of laser-welded cast titanium joints under different conditions. *J prosthet dent*. 1998; 79 (4): 477-48
- Fornaini, c.; merigo, e.; cernavin, i.; de castro, g.l.; vescovi, p. Intraoral laser welding (ilw) in implant prosthetic dentistry: case report. *Case reports in dentistry*. Volume 2012 (2012), article id 839141, 4 pages
- 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..
- Neo, t.k.; chai, j.; gilbert, j.l.; wozniak, w.t.; engelman, m.j. mechanical properties of titanium connectors. *Int j prosthodont*. 1996;9(4):379-93. 7.

- Nuñez pantoja, j.m.; takahashi, j.m.f.k.; nóbilo, m.a.; consani, r.l.x.; mesquita, m.f. radiographic inspection of porosity in ti-6al-4v laser-welded joints. *Braz oral res*, v.25, n. 2, p.103-8, 2011.
- Nuñez pantoja, j.m.c.; vaz, l.g.; nóbilo, m.a.a.; mesquita, m. F. Fatigue performance of joints executed in pure titanium structures with several diameters. *Dental materials journal* 2011; 30(6): 887–893
- Piveta, a.c.g.; montandon, a.a.b.; ricci w.a.; nagle, m.m. mechanical strength and analysis of fracture of titanium joining submitted to laser and tig welding. *Materials research*. 2012; 15(6): 937-943
- Roggensack, m.; walter, m.h.; boning, k.w. studies on laser- and plasma-welded titanium. *Dent mater*. 1993;9(2):104-7.
- Shimakura, m.; yamada, s.; takeuchi, m.; miura, k.; ikeyama, j. Influence of irradiation conditions on the deformation of pure titanium frames in laser welding. *Dent mater j*. 2009 mar;28(2):243-7.
- Silva, j.p.; fernandes neto, a.j.; raposo, l.h.; novais, v.r.; araujo, c.a.; cavalcante, l.d.a.; simamoto júnior, p.c. effect of plasma welding parameters on the flexural strength of ti- 6al-4v alloy. *Braz dent j*. 2012;23(6):686-91.
- Silveira júnior, c.d.; castro, m.g.; davi, l.r.; neves, f.d.; novais, v.r.; simamoto júnior, p.c. (2012). *Welding techniques in dentistry, welding processes*, dr. Radovan kovacevic (ed.), isbn: 978-953-51-0854-2, intech, doi: 10.5772/54256.
- Sjögren, g.; andersson, m.; bergman, m. Laser welding of titanium in dentistry. *Acta odontol scand*. 1988; 46: 247-253.
- Srimaneeponga, v.; yoneyamab, t.; kobayashic, e.; doid, h.; hanawad, t. Comparative study on torsional strength, ductility and fracture characteristics of laser-welded ti-6al-7nb alloy, cp titanium and co-cr alloy dental castings. *Dental materials*, v. 24, p. 839–845, 2008.
- Taylor, j.c.; hondrum, s.o.; prasad, a.; brodersen, c.a. effects of joint configuration for the arc welding of cast ti6al4v alloy rods in argon. *J prosthet dent*. 1998; 79:291-297.
- 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.; pessanha henriques, g.e.; arruda nobilo, m.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(10):1029.

## 6. AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia (FOUFU), ao Centro de Pesquisa Odontológico Biomecânica, Biomateriais e Biologia Celular da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia (CPBio/FOUFU), à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC/UFU), ao Laboratório de Projetos Mecânicos (LPM/FEMEC/UFU), ao Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM/FEMEC/UFU), à FAPEMIG (FAPEMIG2013-SAU001), CAPES e CNPq.

## 7. ABSTRACT

*This study evaluated the tensile strength Ti-6Al-4V alloy welded by TIG (Tungsten Inert Gas) welding. Forty-five specimens were prepared and divided into 5 groups: control group (n=5), with a diameter of 3.0mm and intact specimens, and groups TIG2.5, TIG3, TIG4, TIG5 (n=10) with diameters 2.5,3,4 and 5 mm respectively, welded by TIG. TIG welding was performed with a current of 3A and pulse of 10ms. Radiographic inspection and liquid penetrant examination were performed, followed by tensile strength test and the elongation percentage was calculated. Images of the welded area for subsequent calculation of the percentage of welded area were obtained. The images were evaluated in scan electron microscope (SEM). The results were submitted to ANOVA and Tukey test. Much of the specimens showed internal voids and fractured in the welded area, but not porosities or groves were observed on the other surface. The CG showed tensile strength values statistically similar to the TIG2.5 group, but different to the others. The percentage of elongation of the G.C was superior to TIG2.5 group, higher than the other groups. The TIG2.5 group had the highest percentage of welded area. SEM images showed the presence of bubbles and brittle fractures among the ductile fracture. The diameter of 2.5 mm seems to be the best option for joining prefabricated bars in this type of joint and in this adjustment of the machine.*

## 8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.