

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE LIGA TI-6AL-4V SOLDADA COM PROCESSOS LASER E PLASMA DE USO ODONTOLÓGICO

Morgana Guilherme de Castro, morgana_castro3@hotmail.com

João Paulo Lyra e Silva, joaodf22@hotmail.com

Gabriela Lima Menegaz, Gabriela.menegaz@gmail.com

Cleudmar Amaral de Araújo, cleudmar.araujo@gmail.com

Paulo César Simamoto Júnior, psimamoto@foufu.ufu.br

Resumo: Este trabalho avaliou resistência mecânica de liga de TI-6Al-4V em diferentes diâmetros e distintos processos de soldagem, por meio de ensaio de resistência à tração e método de Elementos Finitos (EF). 45 corpos de prova foram divididos em 9 grupos (n=5): GC (Controle), diâmetro de 3 mm com barras intactas; Grupos PL2.5, PL3, PL4 e PL5 com diâmetros de 2.5, 3, 4 e 5 mm, soldados com solda Plasma; e grupos L2.5, L3, L4 e L5 com diâmetros de 2.5, 3, 4 e 5 mm, soldados com solda Laser. Estas foram submetidas ao ensaio de resistência à tração até ruptura, obtendo-se valores de porcentagem de alongamento. As amostras fraturadas foram analisadas em lupa estereoscópica, as áreas soldadas calculadas e em seguida analisadas em microscópio eletrônico de varredura. Dados foram submetidos à ANOVA, e posteriormente ao teste de Dunnet (comparação entre grupos experimentais - GE e GC), teste de Tukey (comparação das médias entre os GE), e teste T-student (tipos de solda para cada parâmetro analisado). Modelos de EF foram desenvolvidos em ambiente Workbench simulando ensaio de tração. Analisando tensão máxima e porcentagem de área soldada, observou-se diferença estatística entre os GE. GC mostrou maiores valores de tensão máxima que os experimentais. Quanto à porcentagem de alongamento, houve diferença significativa entre GC e GE, mas não entre os GE. Houve correlação positiva entre porcentagem de área soldada e tensão máxima para amostras dos GE e correlação negativa entre esses parâmetros e o diâmetro dos corpos de prova. Não houve diferença entre os dois tipos de solda dentro de cada diâmetro. Diâmetro de 2.5 e 3.0 mm 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 de próteses tanto para Plasma e soldagem a laser.

Palavras-chave: Titânio; Soldagem em Odontologia; Resistência à tração; Método de Elementos Finitos.

1. INTRODUÇÃO

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) como aeroespacial, aviação, automobilística (Cho et. al., 2004), petroquímica, nuclear e médica (Akman et. al., 2008).

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).

Além disso, o uso recente e promissor das ligas de titânio (Ti) na odontologia tem sido impulsionado principalmente pelo desejo de produzir estruturas de baixo peso e alta resistência aos esforços mastigatórios (Hart & Wilson, 2006), uma vez que o Ti apresenta propriedades mecânicas e biológicas favoráveis como: baixa densidade, excelente biocompatibilidade, boa relação resistência/peso e baixo módulo de elasticidade (Williams, 1984; Wang & Welsch, 1995; Wang & Fenton, 1996; Taylor et al., 1998; Chai & Chou, 1998; Liu et al., 2002; Anusavice, 2005; Nuñez-Pantoja et al., 2011).

No entanto, sua alta temperatura de fusão, próximo a 1.700 ° C, e alta reatividade, quando submetido a altas temperaturas, com o nitrogênio, hidrogênio e oxigênio do ar, acabam por torná-lo mais frágil, necessitando, portanto, de

proteção por gás inerte durante seu processamento, geralmente o argônio (Bergman, 1990; Craig et al., 1997; Liu et al., 2002; Watanabe & Topham, 2006).

Assim, a realização de juntas soldadas em odontologia tem se aprimorado com o desenvolvimento e incorporação de conhecimentos de outras áreas como a engenharia, que permitiu o surgimento de novas técnicas e equipamentos para a união dessas uniões soldadas, como uma alternativa à técnica convencional com maçarico - Brasagem (Marques, 2007; Simamoto-Junior, 2008), entre os quais podemos citar: soldagem Laser e soldagens a arco - Solda TIG (Tungsten Inert Gas) e Solda Plasma (Hart & Wilson, 2006).

As soldagens TIG e Plasma são processos nos quais a união é obtida pelo aquecimento dos materiais por um arco estabelecido entre o eletrodo não consumível de tungstênio e a peça a ser soldada (Taylor et al., 1998). 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). Metal de adição pode ser utilizado ou não. Permite a execução de soldas de alta qualidade e excelente acabamento, particularmente em juntas de pequena espessura, permite a soldagem em qualquer posição e apresenta excelente controle da poça de fusão, ou seja, região localizada que está sendo soldada. O seu equipamento básico consiste de uma fonte de energia, tocha com eletrodo de tungstênio, fonte de gás de proteção e um sistema de abertura do arco. A principal diferença entre a solda TIG e a Plasma é a utilização de um bocal constritor que causa a concentração do arco elétrico (Marques et al., 2007).

A soldagem 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; Cho et al., 2003; Rocha et al., 2006; Srimaneepong et al., 2008; Nuñez-Pantoja et al., 2011).

Tem sido demonstrado que a soldagem Laser resulta em menor distorção (Roggensack et al., 1993; Wang & Welsch, 1995; Chai & Chou, 1998; Srimaneepong et al., 2008; Nuñez-Pantoja et al., 2010) em comparação com métodos de soldagem convencionais. A solda laser teria como vantagem a possibilidade de realizar o procedimento laboratorial diretamente no modelo de trabalho e dispendendo de menos tempo de trabalho, otimizando passos necessários para a técnica de Brasagem.

A soldagem Laser é um processo seguro e pode ser realizado próximo às regiões de resinas e cerâmicas, sem riscos de danificá-las (Gordon & Smith, 1970; Chai & Chou, 1998; Shimakura et al., 2009; Nuñez-Pantoja et al., 2011) em virtude da sua reduzida ZAC (Chai & Chou, 1998; Liu et al., 2002; Cho et al., 2003; Rocha et al., 2006; Srimaneepong et al., 2008; Nuñez-Pantoja et al., 2010), força de união da solda compatível com o metal de origem e preservação da anatomia da infra-estrutura metálica (Gordon & Smith, 1970). Além disso, a soldagem Laser pode ser realizada com ou sem metal de adição, e suas principais desvantagens concentram-se no alto custo do equipamento e na dificuldade inicial em se obter boa qualidade de solda (Marques et al., 2007).

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).

Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi avaliar a resistência mecânica de liga de Ti-6Al-4V em diferentes diâmetros submetidos aos processos de soldagem Plasma e Laser por meio de ensaio de resistência à tração e Método de Elementos Finitos (MEF). Gerando a hipótese de que a utilização de um equipamento nacional de solda micro-Plasma pode ser utilizada como uma alternativa à solda Laser e que o aumento do diâmetro influenciará positivamente nos valores de resistência de tração.

2. METODOLOGIA

Quarenta e cinco corpos de prova de liga de Ti-6Al-4V, em formato de algarismos de acordo com a norma ASTM E8, como demonstra a Fig. (1), foram divididos em 9 grupos (n= 5): GC (Grupo Controle) com diâmetro de 3 mm, constituídos por barras intactas; Grupos PL2.5, PL3, PL4 e PL5 com diâmetros de 2.5, 3, 4 e 5 mm respectivamente, soldados com solda Plasma e grupos L2.5, L3, L4 e L5 com diâmetros de 2.5, 3, 4 e 5 mm respectivamente, soldados com solda Laser. O processo de soldagem Plasma foi executado com profundidade de 10 A e pulso de 3 ms e o Laser com profundidade de 365 V e pulso de 9ms com foco e frequência calibrados em zero. As amostras foram submetidas ao ensaio de resistência à tração em máquina serviço hidráulica com velocidade de 0,02mm/min até a ruptura e os valores de porcentagem de alongamento foram obtidos, subtraindo-se o comprimento inicial do comprimento final e dividindo-se o resultado pelo comprimento inicial. As amostras fraturadas foram analisadas em lupa estereoscópica e as áreas soldadas foram calculadas. As imagens mais representativas foram avaliadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) nos aumentos de 500 e 1200x. Modelos aproximados de EF foram desenvolvidos em ambiente Workbench com condições de contorno simulando um ensaio de tração. A liga de Ti-6Al-4V foi analisada como sendo isotrópica, elástica e contínua. O módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson das estruturas correspondente ao metal base foram oferecidos pelo próprio software, o valor do módulo de elasticidade foi aumentado em torno de 20%

para a área de solda. As condições de contorno estruturais foram definidas basicamente em restrições no deslocamento de uma face lateral da estrutura, ou seja, com parte do modelo engastada (fixa), sem liberdade de movimento e a força aplicada na face lateral oposta com sua direção paralela ao eixo Z. Os valores de força utilizados foram fornecidos pelo ensaio de resistência à Tração. Após a etapa de processamento foram obtidos os dados dos campos do deslocamento no eixo Z (mm) e tensão principal máxima (Mpa). 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 e tensão dos modelos numéricos foram então comparados com os valores de deslocamento e tensão experimentais. Como os resultados foram próximos, o modelo de EF foi validado.

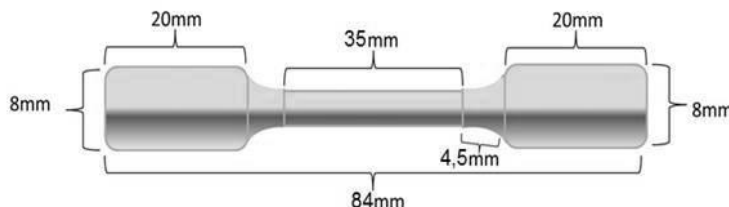


Figura1: Dimensões do corpo de prova (ASTM E8).

3. RESULTADOS

3.1. Solda Plasma

As médias e desvio padrão para o parâmetro tensão máxima estão descritos na Tab. (1). O grupo controle (1008,46+37,1) apresentou maiores valores de tensão máxima do que os grupos experimentais. Dentro dos grupos experimentais o grupo PL2.5 (627,32+94,18) e PL3 (571,54+108,64) apresentaram os maiores valores de tensão máxima e o grupo PL5 (320,6+38,68) apresentou os menores valores.

Tabela 1. Valores de tensão máxima (Unidade: Mpa).

Grupo	Controle	PL2.5	PL3	PL4	PL5
Média	1008,46 ^A	627,32 ^B	571,54 ^{BC}	434,82 ^{CD}	320,6 ^D
Desvio Padrão	37,1	94,18	108,64	79,64	38,68

As médias e desvio padrão da porcentagem de alongamento estão descritos na Tab. (2). As médias de porcentagem de alongamento para todos os grupos testes variam entre 0,38% (grupo PL4) à 1,62% (grupo PL5), 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 2. Porcentagem de alongamento (Unidade: %).

Grupo	Controle	PL2.5	PL3	PL4	PL5
Média	7,48 ^A	1,60 ^B	1,44 ^B	0,38 ^B	1,62 ^B
Desvio Padrão	1,18	1,02	0,94	0,32	0,93

As médias e desvio padrão para porcentagem de área soldada estão descritos na Tab. (3). Como as amostras foram previamente numeradas em a e b e todas as amostras fraturaram na região de solda, 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 (47,93+1,89) e PL3 (43,80+2,46) apresentaram os maiores valores de porcentagem de área soldada e o grupo PL5 (26,60+1,89) os menores.

Tabela 3. Porcentagem de área de solda (unidade %).

Grupo	PL2.5	PL3	PL4	PL5
Média	47,93 ^A	43,80 ^{AB}	36,66 ^B	26,60 ^C
Desvio Padrão	1,86	2,46	6,06	1,89

As figuras abaixo são referentes às imagens obtidas na Lupa estereoscópica e Microscópio Eletrônico de varredura (MEV) para os corpos de prova soldados com solda Plasma após o ensaio de resistência à tração.

A Fig. (2) mostra imagens da secção transversal dos corpos de prova soldados após o ensaio de tração, que 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 para todas as amostras.

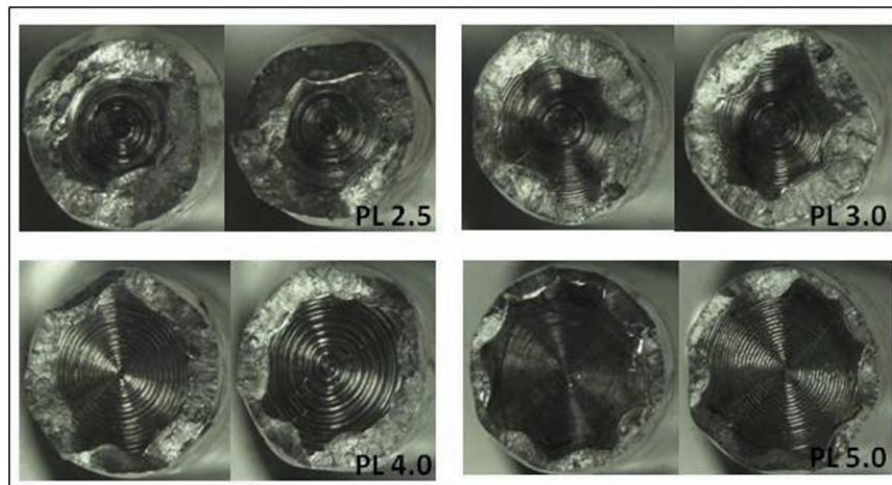


Figura 2 – Imagens obtidas por meio de lupa estereoscópica.

A Fig. (3a e c) mostra imagens de MEV (ampliação de 500x) da área de fratura da solda e as Fig. (3b e d) mostra imagens de MEV (aumento de 1200x). Elas revelam que a fratura na liga de TI-6AL-4V tem uma superfície em geral plana, regiões com uma forma de colmeia característica do Ti e mais característica de uma fratura frágil e contém ondulações superficiais (áreas mais elevadas em relação ao plano), chamadas de *dimples*, indicativos de uma pequena quantidade de ductilidade. Além disso, podem ser vistas algumas falhas como bolhas e porosidades apontadas pelas setas vermelhas.

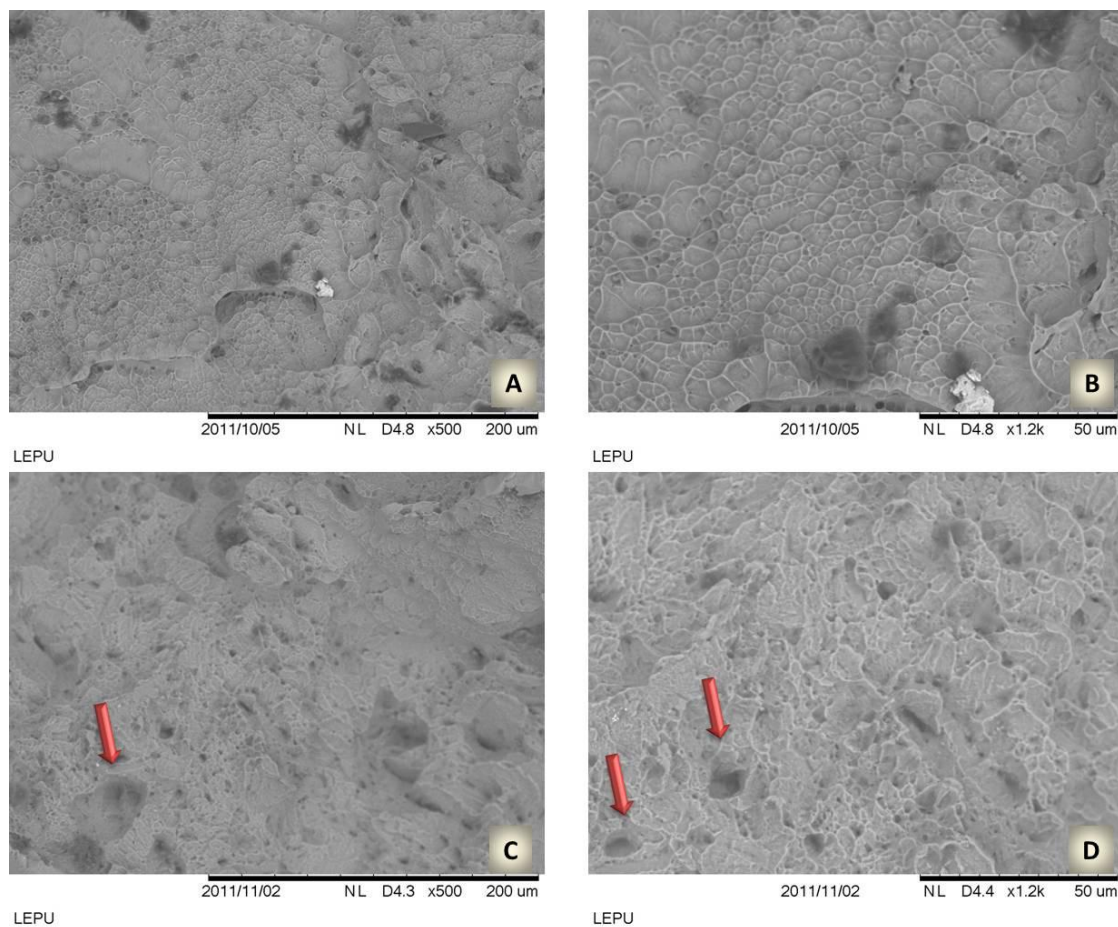


Figura 3: a e b): Amostra de imagens de MEV nos aumentos de 500x e 1200x de corpos de prova do grupo PL3, respectivamente; c e d): Exemplos de imagens de MEV nos aumentos de 500x e 1200x de corpos de prova do grupo PL5, respectivamente.

3.2. Solda Laser

As médias e desvio padrão para o parâmetro tensão máxima estão descritos na Tab. (4). O grupo controle (1008,46+37,1) apresentou maiores valores de tensão máxima do que os grupos experimentais. Dentro dos grupos experimentais o grupo L2.5 (762,94+133,57) e L3 (601,93+232,99) apresentaram maiores valores de tensão máxima e os grupo L4 (542,78+179,98) e L5 (515,57+154,23) apresentaram os menores valores.

Tabela 4. Valores de tensão máxima (Unidade: Mpa).

Grupo	Controle	L2.5	L3	L4	L5
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

As médias e desvio padrão da porcentagem de alongamento estão presentes na Tab. (5). 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 5. Porcentagem de alongamento (Unidade: %).

Grupo	Controle	L2.5	L3	L4	L5
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 Tab. (6). 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+8,03) e PL3 (70,91+8,02) apresentaram os maiores valores de porcentagem de área soldada e o grupos PL4 (56,03+2,80) e PL5 (52,57+7,48) os menores.

Tabela 6. Porcentagem de área de solda (unidade %).

Grupo	L2.5	L3	L4	L5
Média	73,21 ^A	70,91 ^A	56,03 ^B	52,57 ^B
Desvio Padrão	8,03	8,02	2,80	7,48

As figuras abaixo são referentes às imagens obtidas na Lupa estereoscópica e Microscópio Eletrônico de varredura (MEV) para os corpos de prova soldados com solda Laser após o ensaio de resistência à tração.

A Fig. (4) mostra imagens da secção transversal dos corpos de prova soldados após o ensaio de tração, que 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 para todas as amostras.

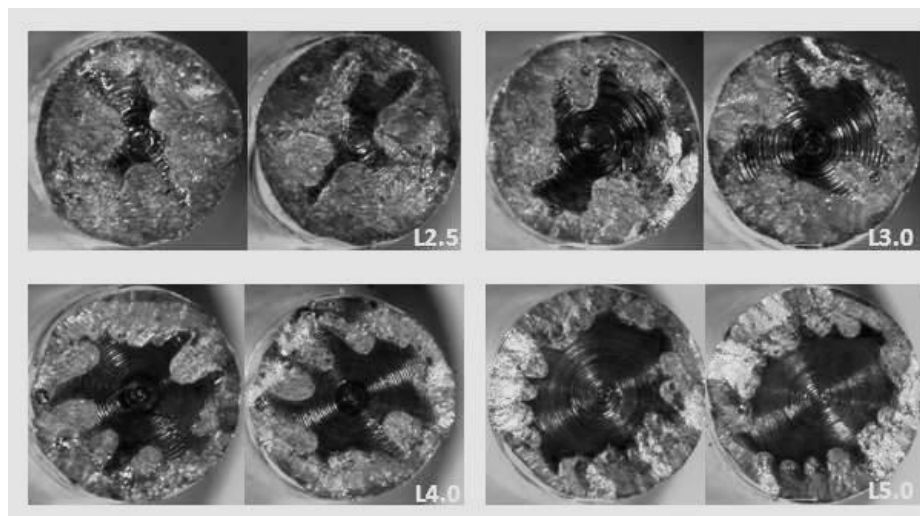


Figura 4 – Imagens obtidas por meio de lupa estereoscópica.

A Fig. (5a e c) mostra imagens de MEV (ampliação de 500x) da área de fratura da solda e as Fig. (5b e d) mostra imagens de MEV (aumento de 1200x). Elas revelam que a fratura na liga de TI-6AL-4V tem uma superfície em geral plana, regiões com uma forma de colmeia característica do Ti e mais característica de uma fratura frágil e contém ondulações superficiais (áreas mais elevadas em relação ao plano), chamadas de *dimples*, indicativos de uma pequena quantidade de ductilidade. Além disso, podem ser vistas algumas falhas como bolhas e porosidades apontadas pelas setas vermelhas.

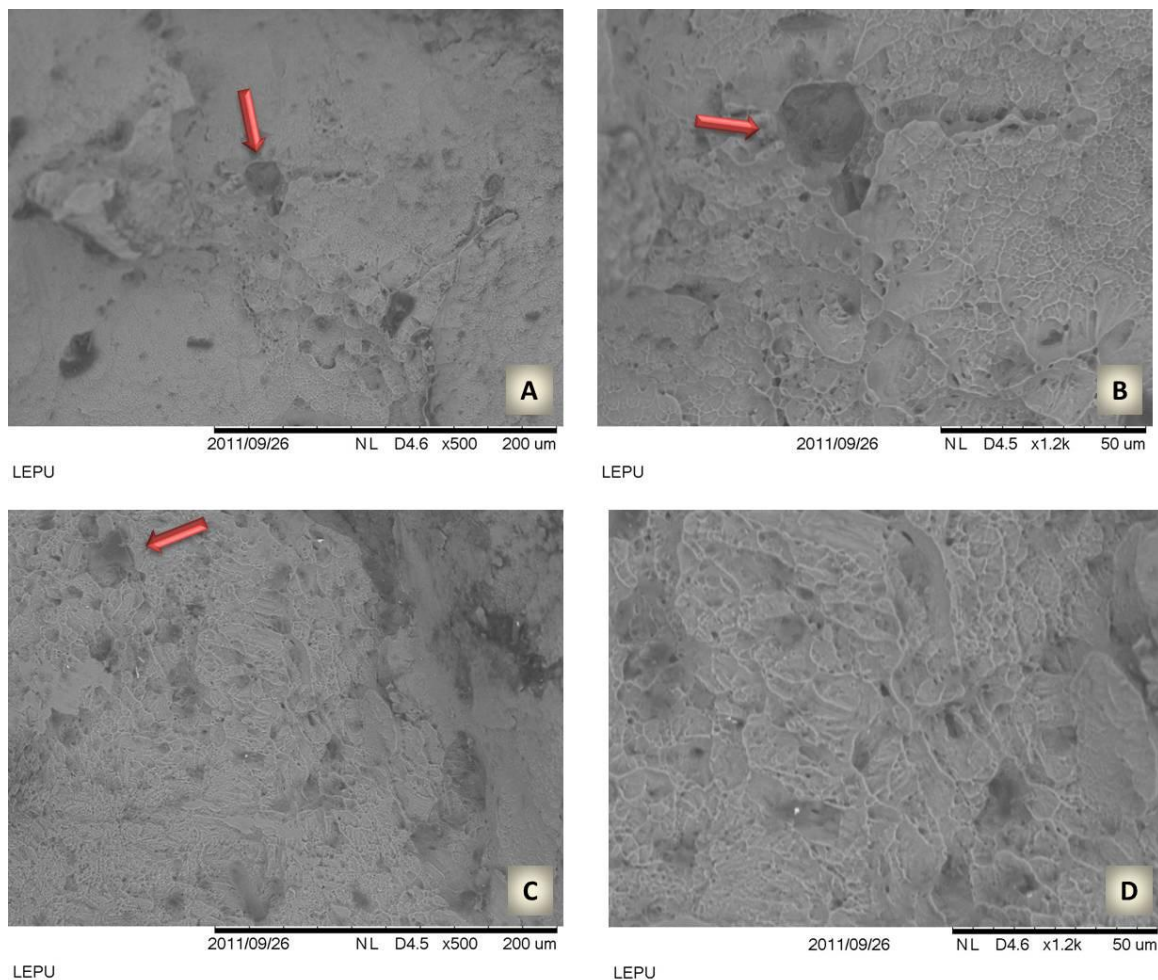


Figura 5: a e b): Exemplos de imagens de MEV nos aumentos de 500x e 1200x de corpos de prova do grupo L2.5, respectivamente; c e d): Exemplos de imagens de MEV nos aumentos de 500x e 1200x de corpos de prova do grupo L5, respectivamente.

3.3. Solda Plasma x Solda Laser

Comparando-se os valores de tensão máxima entre os diferentes tipos de solda, foi possível observar, por meio da Tab. (7) que não houve diferença estatística entre os diferentes tipos de solda (solda Plasma e solda Laser) para todos os diâmetros.

Tabela 7. Comparação de médias + desvio padrão da tensão máxima frente a tratamentos com solda laser e plasma com diferentes diâmetros sem o grupo controle.

Tipo de solda	Diâmetro			
	2,5	3,0	4,0	5,0
Laser	762,95+133,58 ^a	601,93+232,99 ^a	542,78+179,98 ^a	515,57+154,24 ^a
Plasma	627,32+94,18 ^a	571,54+108,64 ^a	434,82+79,64 ^a	320,60+38,68 ^a

Para o parâmetro alongamento também não houve diferença estatística significativa entre os diferentes tipos de solda para os grupos experimentais com diâmetro de 2.5, 3 e 5mm, somente para o grupo experimental com diâmetro de 4mm como pode ser observado na Tab. (8).

Tabela 8. Comparação de médias + desvio padrão da porcentagem de alongamento frente a tratamentos com solda laser e plasma com diferentes diâmetros sem o grupo controle.

Tipo de solda	Diâmetro			
	2,5	3,0	4,0	5,0
Laser	1,98+1,88 ^a	1,07+0,77 ^a	1,01+0,32 ^a	0,78+0,31 ^a
Plasma	1,60+1,02 ^a	1,44+0,94 ^a	0,38+0,32 ^b	1,62+0,93 ^a

Para o parâmetro porcentagem de área soldada houve diferença estatística significativa entre os diferentes tipos de solda para todos os grupos experimentais, como pode ser observado na Tab. (9) sendo que os grupos soldados pelo processo Laser apresentaram as maiores porcentagens de área soldada que os grupos submetidos à solda Plasma.

Tabela 9. Comparação de médias + desvio padrão da porcentagem de área de solda frente a tratamentos com solda laser e plasma com diferentes diâmetros.

Tipo de solda	Diâmetro			
	2.5	3.0	4.0	5.0
Laser	73,21+7,85 ^a	70,91+6,85 ^a	56,03+2,56 ^a	52,57+7,88 ^a
Plasma	47,93+5,44 ^b	43,80+6,27 ^b	36,64+4,92 ^b	26,61+1,41 ^b

3.4. Método de Elementos Finitos

3.4.1. Controle

É possível perceber no gráfico tensão x deformação que as curvas tanto do grupo experimental quanto para o modelo de EF se cruzam. No gráfico força x deformação, a curva do grupo controle dado pelo experimento mostra um comportamento dúctil com pontos nas fases elástica e plástica, como este modelo numérico só é avaliado na fase elástica os pontos da fase plástica não aparecem no gráfico.

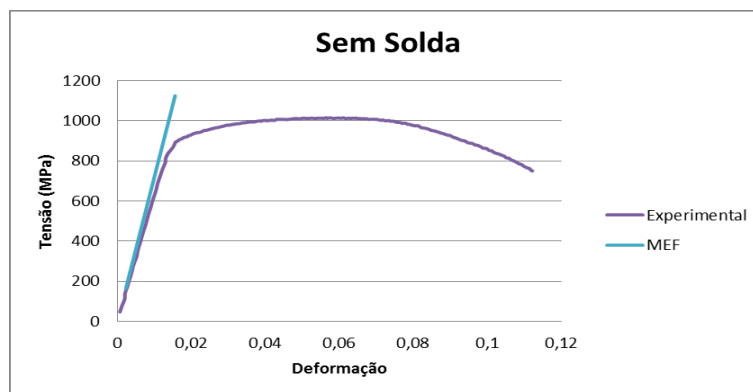


Gráfico 1 – Curva Tensão x deformação para o grupo controle e para o MEF.

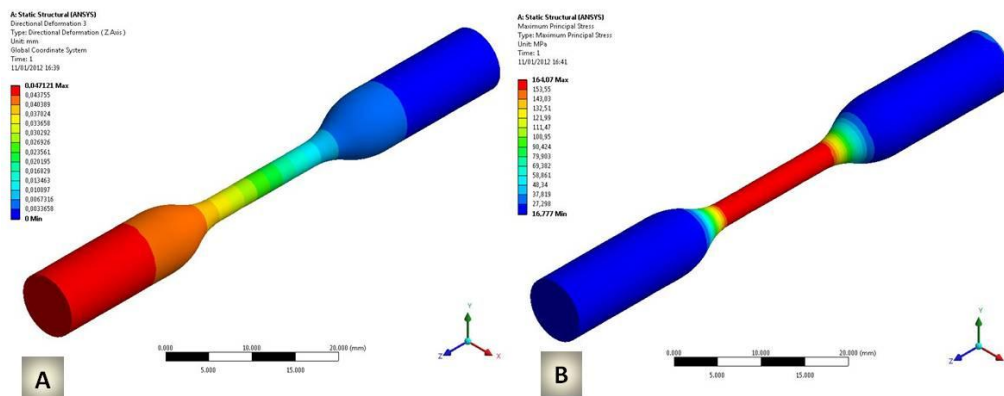


Figura 6: a) Imagem representativa da deformação direcional no eixo Z e b) Imagem representativa da tensão máxima principal para os corpos de prova intactos.

Foi possível perceber a partir da Fig. (6a), que houve deslocamento ao longo de todo o corpo de prova e a partir da Fig. (6b), que houve uma concentração de tensão ao longo de toda a parte central do corpo de prova, mostrando que a ruptura deste pode acontecer em qualquer ponto desta região.

3.4.2. Solda Plasma

É possível perceber no gráfico tensão x deformação que as curvas do grupo experimental e as do modelo de EF estão bem próximas, entretanto mais ajustes no modelo de EF, quanto a geometria e propriedades do material na área de solda, são necessários para que estas curvas se aproximem ainda mais. Embora estes modelos sejam iniciais para se trabalhar com estruturas soldadas, este pode ser utilizado como representativo de um processo de soldagem a Plasma.

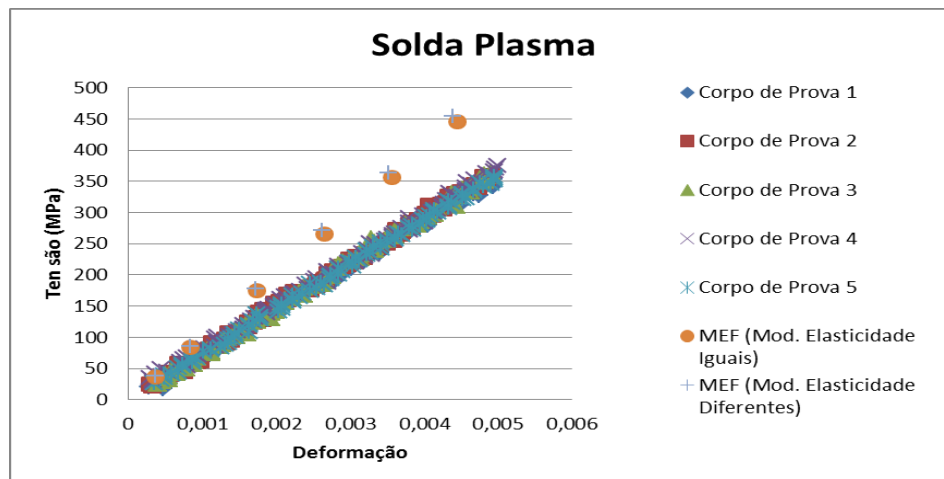


Gráfico 2 – Curva Tensão x deformação para o grupo controle e para o MEF.

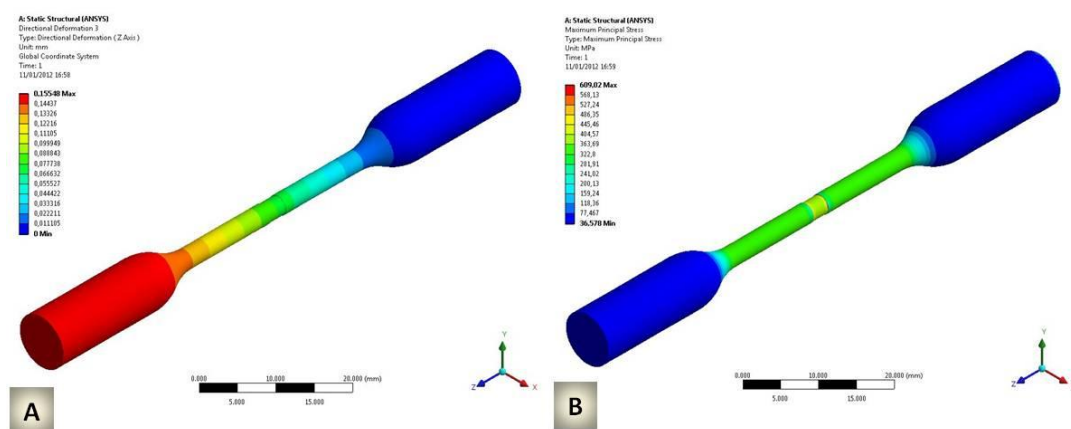


Figura 7: a) Imagem representativa da deformação direcional no eixo Z e b) Imagem representativa da tensão máxima principal para os corpos de prova intactos.

Foi possível perceber a partir da Fig. (7a), que houve deslocamento ao longo de todo o corpo de prova e a partir da Fig. (7b), que houve uma concentração de tensão na região correspondente à solda no corpo de prova, mostrando que a ruptura deste pode acontecer nesta região.

3.4.3. Solda Laser

É possível perceber no gráfico tensão x deformação que as curvas do grupo experimental e as do modelo de EF estão bem próximas, entretanto mais ajustes no modelo de EF, quanto a geometria e propriedades do material na área de solda, são necessários para que estas curvas se aproximem ainda mais. Embora estes modelos sejam iniciais para se trabalhar com estruturas soldadas, este pode ser utilizado como representativo de um processo de soldagem Laser.

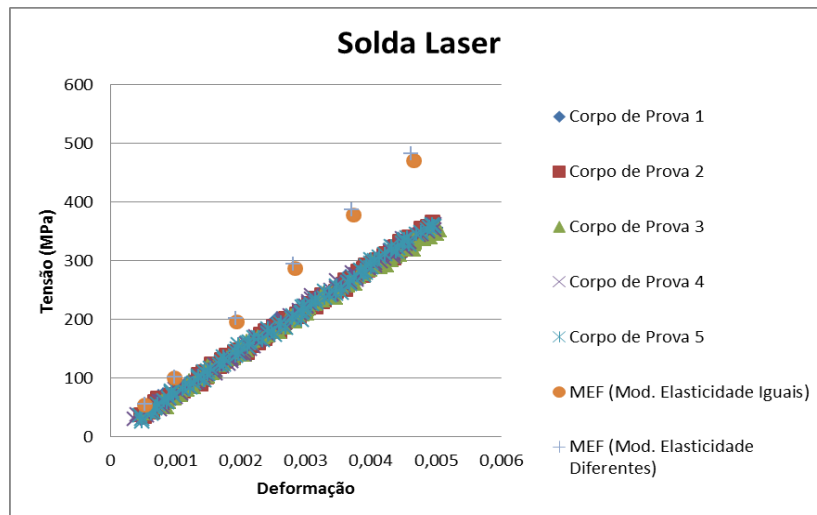


Gráfico 3 – Curva Tensão x deformação para o grupo controle e para o MEF.

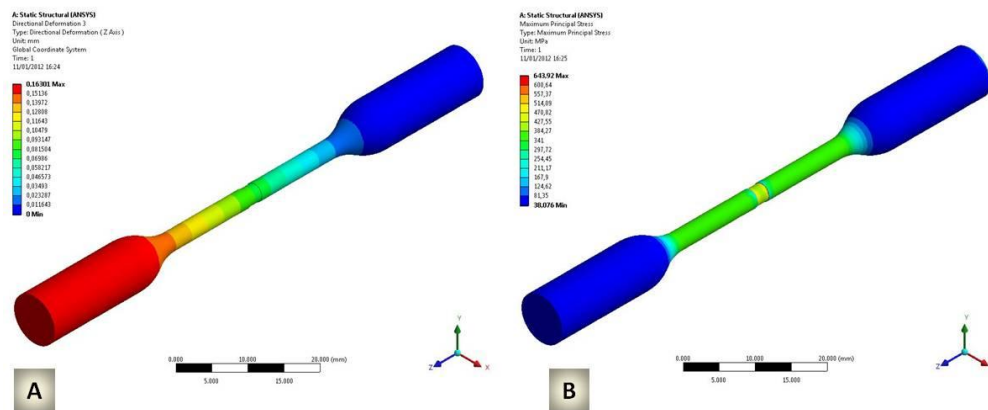


Figura 8: a) Imagem representativa da deformação direcional no eixo Z e b) Imagem representativa da tensão máxima principal para os corpos de prova intactos.

Foi possível perceber a partir da Fig. (8a), que houve deslocamento ao longo de todo o corpo de prova e a partir da Fig. (8b), que houve uma concentração de tensão na região correspondente à solda no corpo de prova, mostrando que a ruptura deste pode acontecer nesta região.

4. DISCUSSÃO

Os resultados mostraram que os valores de tensão máxima foram superiores para o grupo controle quando comparados aos grupos submetidos à soldagem Plasma e soldagem Laser independente do diâmetro das amostras, contrariando os achados de alguns autores (Roggensack et al., 1993; Berg et al., 1995; Neo et al., 1996; Liu et al., 2002; Srimaneepong et al., 2008) que afirmaram que quando as condições de soldagem forem adequadas, a resistência mecânica das uniões soldadas são igual ou superior ao metal base de corpos de prova intactos. Os modelos de EF mostram que no grupo controle a concentração de tensão está localizada em toda a parte central e nos grupos soldados por Plasma e Laser a tensão concentra-se na região de solda. Em condições ótimas os modelos deveriam apresentar comportamentos semelhantes, significando que a fratura poderia ocorrer em qualquer região do metal base assim como no grupo controle.

Vários fatores, consequentes da técnica utilizada, contribuíram para que tais resultados fossem obtidos. Um deles refere-se aos processos de soldagem a arco elétrico que é caracterizado pela imposição de grande quantidade de calor localizado, com a finalidade de conseguir a fusão do material de adição e do material de base, fazendo com que ocorram importantes transformações microestruturais. Essas transformações ocorrem numa região denominada ZAC, região do metal de base cuja estrutura ou propriedades foram alteradas pela variação da temperatura durante a soldagem (Botega 2005, Meadows & Fritz, 2005). Alterações que geram uma complexa região de tensões e deformações, levando a resultados nem sempre desejados, como distorção do material, tensões residuais, geração de microestruturas frágeis, crescimento de grãos, trincas, fissurações, mudança das propriedades mecânicas, físicas e químicas, entre outros (Ramirez et al., 2005).

Assim como as uniões soldadas com processos de soldagem a arco, as uniões soldadas por solda Laser também sofrem de defeitos resultantes, entre outros motivos, da tensão residual. Normalmente, a tensão residual introduzida nas uniões de solda é uma consequência da tensão térmica causada pelos ciclos de aquecimento e resfriamento do processo de soldagem. Portanto, isso afeta o comportamento mecânico das estruturas soldadas à Laser (Cho et al., 2003).

Outro fator importante é o fato de que tanto no processo de soldagem a arco como de soldagem Laser, o Ti 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 (Roggensack et al., 1993; Botega 2005), resultando em redução na qualidade de suas propriedades, como menor ductilidade e menores valores de resistência à tração (Chai & Chou, 1998; Botega 2005), mesmo sendo soldados em máquinas de soldagem com proteção de gás inerte.

A redução da ductibilidade (Berg et al., 1995) pode ser observada nas figuras de MEV, que demonstram que as superfícies das fraturas apresentam-se em geral plana com ondulações superficiais, chamadas de *dimples* (Sjögren et al., 1988; Wang & Welsch, 1995; Botega 2005), o que indica uma pequena quantidade de ductilidade, além disso podem ser comprovadas pelos valores de porcentagem de alongamento, em que a média dos valores de porcentagem de alongamento para o grupo controle apresentou diferença estatística significativa ($p < .05$) em relação aos grupos experimentais e superiores a estes. Entretanto um corpo de prova rompeu na região do metal base e não na união soldada e este apresentou porcentagem de alongamento (5,11%) superior aos demais corpos de prova dentro do mesmo grupo.

Berg et al., 1995, descrevem que as porosidades e bolhas geradas durante o processo de soldagem Laser são os responsáveis pela redução dos valores de resistência à tração dos grupos experimentais em relação ao controle e que a resistência à tração depende principalmente da ocorrência de falhas do que das propriedades do material na região de solda. 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 (Watanabe & Topham, 2006; Roggensack et al., 1993; Zavanelli et al., 2004; Botega 2005; Nuñez-Pantoja et al., 2011). Nas figuras de MEV é possível identificar várias bolhas e porosidades que podem ter sido resultantes do aprisionamento do gás argônio durante a soldagem tanto para a solda Plasma como para a solda Laser (Figura 19 e 24).

Estas bolhas e falhas funcionam como iniciadores de fratura, uma vez que atuam como pontos de concentração de tensões, podendo levar ao fracasso da estrutura soldada em um curto período de tempo, sob aplicação de tensões inferior àquela que uma união adequada suportaria (Neo et al., 1996). Na ausência dessas imperfeições a fratura deveria ocorrer no metal base, significando que toda a junta foi completamente soldada (Berg et al., 1995), assim como ocorreu no corpo de prova 2 do grupo L2.5 em que a ruptura do corpo de prova ocorreu no metal base e não na região de solda, levando-nos a inferir que toda a seção transversal foi soldada sem falhas ou porosidades.

Por outro lado, valores de resistência à tração para os grupos experimentais menores do que os do grupo controle são em parte, resultados de uma união incompleta penetração (Wang & Welsch, 1995). De acordo com alguns autores (Chai & Chou, 1998; Liu et al., 2002), a profundidade de penetração da solda é o fator principal que afeta os valores de resistência de infraestruturas soldadas à Laser.

Quando a penetração da solda Laser é insuficiente, uma grande bolha ou falha interna acontece (Baba & Watanabe, 2005; Nuñez-Pantoja et al., 2011). Isso pôde ser visto nas imagens de lupa estereoscópica tanto para solda Plasma quanto para solda Laser, principalmente para as de maior diâmetro, ficando a solda confinada à periferia da amostra. Imagens semelhantes foram encontrada por outros autores como Sjögren et al. (1988), Wang & Welsch (1995) e Neo et al. (1996); Botega 2005.

Assim uma das hipóteses que motivou o trabalho foi rejeitada, pois o aumento do diâmetro influenciou negativamente a resistência à tração e a porcentagem de área soldada de amostras usinadas em liga TI-6AL-4V, entretanto estes valores foram obtidos para uma mesma regulagem da máquina, que para a solda Plasma foi de 10 A e 3 ms e para solda Laser foi de 365V e 9 ms.

O nível de energia do processo de soldagem a laser pode ser controlado por dois parâmetros: voltagem ou corrente e duração do pulso (Chai & Chou, 1998). A voltagem controla a potência de soldagem, e um aumento na tensão leva a uma maior profundidade de penetração da solda e a duração do pulso determina o diâmetro do ponto de solda, que será maior se uma maior duração de pulso é utilizada (Chai & Chou, 1998; Baba & Watanabe, 2004). Entretanto a duração do pulso parece não ser um fator significativo para os valores de resistência enquanto o fator tensão ou corrente parece ser um fator bastante significativo (Chai & Chou, 1998).

Entretanto, quando a intensidade da solda a Laser é excedida e o fornecimento de energia é prolongado, a temperatura do metal derretido excede o ponto de fusão e faz com que o metal fundido evapore. Os aumentos no volume de metal evaporado, em comparação com a de metal fundido provoca uma alta pressão. A pressão do metal evaporado cria turbulência no metal fundido e forma uma cavidade chamada Keyhole (Baba & Watanabe, 2004) que em situações favoráveis otimiza a penetração da solda, entretanto nestes casos de altos níveis de energia pode danificar superficialmente a estrutura. Por outro lado, essas alterações estruturais superficiais poderia não ser o mais importante em comparação com a resistência à tração, assim valores elevados de voltagem podem ser usados para diâmetros maiores para obter profundidade de penetração suficiente da solda em estruturas protéticas.

Alguns autores (Chai & Chou, 1998; Liu et al., 2002), constataram que a profundidade de penetração de solda a laser para o Ti foi proporcional à corrente ou voltagem e que o alongamento e resistência à tração foram

significativamente influenciados por este parâmetro. Assim, para obter melhores resultados, especialmente para diâmetros maiores, a regulagem dos equipamentos é um ponto fundamental (Sjogren et al., 1988; Roggensack et al., 1993), já que pode ser observado que, apesar da existência de numerosos estudos sobre a soldagem a laser na literatura, não existe um protocolo estabelecido de solda (Nuñez-Pantoja et al., 2011).

Outro quesito que deve ser avaliado e que poderia influenciar é a configuração da junta. O tipo de junta utilizado neste estudo parece não ser a melhor para os diâmetros maiores, de 4 e 5mm em virtude da limitada energia de soldagem das máquinas de solda voltadas para odontologia. Possivelmente, um outro projeto, como uma junta do tipo topo a topo em formato de 'X'. No junta em formato de 'X', o centro é mantido justapostos, permitindo a penetração da solda em profundidade (Zupancic et al., 2006).

Quanto ao método de soldagem, foi possível verificar que neste trabalho os valores de resistência à tração dos corpos de prova soldados com Solda Plasma e Solda Laser não apresentaram diferenças estatisticamente significantes entre si dentro de cada diâmetro analisado (Tabela 09). Além disso, apresentam vantagens semelhantes como: podem ser realizadas no próprio modelo; permitem a soldagem em áreas próximas à resina e porcelana; permitem a soldagem em qualquer posição e requerem menos tempo de profissional (Baba & Watanabe, 2004; Rocha et al., 2006).

Dessa forma, a outra hipótese que motivou o trabalho foi aceita, de que a solda Plasma pode ser utilizada como uma alternativa à solda Laser, em virtude do alto custo do equipamento desta última, o que poderia diminuir o valor agregado das reabilitações e otimizar o tratamento. Tendo o cuidado de observar que a técnica plasma é mais sensível quando comparada a técnica laser. Notamos que o grupo laser mesmo não apresentando diferença estatística significativa com o grupo plasma, apresenta resultados mais uniformes em todos os seus diâmetros.

Entretanto esta hipótese aceita não pode ser tida como um resultado totalmente conclusivo, visto que os valores de tensão máxima considerados neste estudo foram os valores oferecidos pela própria máquina de ensaio que considera a resistência de toda a secção transversal. Para futuros trabalhos os valores de tensão máxima obtidos dos ensaios experimentais devem ser estimados considerando somente a área resistente de tração (área efetivamente soldada). Espera-se que este procedimento modifique as curvas tensão x deformação para os vários corpos de prova analisados.

Além disso, 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, outros tipos de avaliações podem ser feitas em trabalhos futuros como ensaios não-destrutivos por meio de Micro Computed Tomography (Micro-CT) e inspeção radiográfica combinados a outros ensaios destrutivos.

Outra limitação deste trabalho refere-se aos modelos computacionais. Embora a caracterização e avaliação da resistência mecânica e do comportamento biomecânico de estruturas soldadas na odontologia possa ser feita utilizando modelagem por EF, as não-linearidades do processo, como variação do comportamento mecânico na região da solda, formação de micro-vazios, efeitos de corrosão interna, variação da área de soldagem em função da resistência do material versus parâmetros de soldagem, influência do ambiente e do processo, a definição de um modelo geométrico e de EF que caracterize esta região deve ser mais explorada em trabalhos futuros.

Neste trabalho, a proposta foi introduzir algumas modificações geométricas e no módulo de elasticidade visando modelar numericamente esta região. Neste caso, a avaliação deste modelo foi feita considerando os resultados dos testes de tração para os processos Plasma e Laser. Este primeiro modelo desenvolvido considera toda a secção transversal soldada. Neste caso, as condições de contorno e geometria foram modificadas visando ajustar os sinais de tensão versus deformação na fase elástica. Assim, novos modelos numéricos representativos da área de solda efetiva devem ser desenvolvidos com novas geometrias e condições de contorno visando efetivos valores de tensão versus deformação.

Embora a liga de Ti-6Al-4V tenha sido utilizada neste trabalho em virtude de suas propriedades químicas, mecânicas e biológicas favoráveis (Williams, 1984; Wang & Welsch, 1995; Wang & Fenton, 1996; Taylor et al., 1998; Chai & Chou, 1998; Liu et al., 2002; Anusavice, 2005; Nuñez-Pantoja et al., 2011), outras ligas podem ser utilizadas para avaliação e comparadas com os resultados obtidos neste trabalho.

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, tanto para solda Plasma quanto para solda Laser. O equipamento de solda Plasma parece ser uma alternativa ao equipamento de solda laser, não apresentando diferenças estatísticas entre si para cada diâmetro.

6. AGRADECIMENTOS

Aos órgãos de fomento (FAPEMIG, CNPq e CAPES), à FOUFU, à ESTES/UFU, à FEMEC/ UFU e ao LPM.

7. REFERÊNCIAS

- Akman E, Demir A, Anel T, Sinmazçelik T. Laser welding of Ti6Al4V titanium alloy. *Journal of materials processing technology*. 2008.
- American Welding Society - AWS, Rules for welding in structural steel / 1992.
- 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.
- Anusavice KJ. Phillips, materiais dentários. 11 ed. Rio de Janeiro: Elsevier; 2005.
- Araújo, DB. Metodologia para o uso de simulação física no estudo da ZAC e na obtenção de diagramas CCT para soldagem. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Mecânica. Dissertação de mestrado. 2008.
- Baba N, Watanabe I. Penetration depth into dental casting alloys by Nd:YAG laser. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. 2004;72(1):64-8.
- Blackman R, Barghi N, Tran C. Dimensional changes in casting titanium removable partial denture frameworks. *J Prosthet Dent*. 1991 Feb;65(2):309-15.
- 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.
- Bergman, M. Cast titanium in dental constructions. DPNOVA AB Malmo: Sweden, Aug. 1990. [Manual].
- Byrne G. Soldering in Prosthodontics—An Overview, Part I. *Journal of Prosthodontics*. 2011; 1–11.
- 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. Tese doutorado. 2005.
- Chai. T.; Chou, C.K. Mechanical properties of laser-welded cast titanium joints under different conditions. *J Prosthet Dent*. 1998; 79 (4): 477-483.
- Cho S-K, Yang Y-S, Son K-J, Kim J-Y. Fatigue strength in laser welding of the lap joint. *Finite Elements in analysis and design*. 2004. 40:1059-1070.
- 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.
- Gordon TE, Smith DL. Laser welding of prostheses – an initial report. *J Prosthet Dent*. 1970; 24 (4): 472-476.
- Hart, C.N.; Wilson, P.R. Evaluation of welded titanium joint used with cantilevered implant-supported prostheses. *J Prosthet Dent*. 2006; 96:25-36.
- Lin MC, Lin SC, Wang YT, Hu SW, Lee TH, Chen LK, Huang H. Fracture resistance of Na:YAG Laser-welded cast titanium joints with various clinical thicknesses and welding pulse energies. *Dental Materials Journal*. 2007; 26(3):367-372.
- Liu J, Watanabe I, Yoshida K, Atsuta M. Joint strength of laser-welded titanium. *Dent Mater*. 2002;18:143–148.
- Marques, P.V. Tecnologia da soldagem. Belo Horizonte: ESAB, 1991.
- Meadows C & Fritz JD (2005). Understanding Stainless Steel Heat-Affected Zones. *Welding Journal*. 26-30.
- Neo Tk, Chai J, Gilbert JL, Wozniak WT, Engelman MJ. Mechanical properties of titanium connectors. *Int J Prosthodont*. 1996;9(4):379-93. 7.
- Núñez-Pantoja JM, Takahashi JMF, Nóbilo MA, Consani RLX, Mesquita MF. Radiographic inspection of porosity in Ti-6Al-4V laser-welded joints. *Braz Oral Res*, v.25, n. 2, p.103-8, 2011.
- Núñez-Pantoja JM, Vaz LG, Nóbilo MA, Henriques GE, Mesquita MF. Effects of laser-weld joint opening size on fatigue strength of Ti-6Al-4V structures with several diameters. *J Oral Rehabil*. 2011; 38: 196-201.
- Rade DA. Apostila Método dos Elementos Finitos, Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – UFU, Uberlândia/MG. 2008.
- Ramirez JE, Mishael S, Shockley R (2005). Properties and Sulfide Stress Cracking Resistance of Coarse-Grained Heat-Affected Zones in V-Microalloyed X60 Steel Pipe. *Welding Journal*. 113-123.
- 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 MH, Boning KW. Studies on laser- and plasma-welded titanium. *Dent Mater*. 1993;9(2):104-7.
- 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.
- 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.
- Sjögren G, Andersson M, Bergman M. Laser welding of titanium in dentistry. *Acta Odontol Scand*. 1988; 46: 247-253.