

Morgana Guilherme de Castro

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

Dissertação apresentada à Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia, para obtenção do Título de Mestre em Odontologia – Área de concentração Clínica Odontológica Integrada.

Uberlândia  
2012

Morgana Guilherme de Castro

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

Dissertação apresentada à Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia, para obtenção do Título de Mestre em Odontologia – Área de concentração Clínica Odontológica Integrada.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cézar Simamoto Júnior  
Co-orientador: Prof. Dr. Cleudmar Amaral Araújo

Banca Examinadora:  
Prof. Dr. Paulo Cézar Simamoto Júnior  
Prof. Dr. Cleudmar Amaral Araújo  
Prof. Dr. Alfredo Júlio Fernandes Neto  
Prof. Dr. Ricardo Faria Ribeiro

Uberlândia  
2012

## **FICHA CATALOGRÁFICA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ODONTOLOGIA



ESCOLA TÉCNICA DE SAÚDE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ODONTOLOGIA



A Comissão Julgadora dos trabalhos de Defesa de Dissertação de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Odontologia, em sessão pública realizada em 17 de Fevereiro de 2012, considerou a candidata Morgana Guilherme de Castro aprovada.

1. Prof. Dr. Paulo Cézar Simamoto Júnior (Orientador) \_\_\_\_\_
2. Prof. Dr. Alfredo Júlio Fernandes Neto \_\_\_\_\_
3. Prof. Dr. Cleudmar Amaral Araújo \_\_\_\_\_
4. Prof. Dr. Ricardo Faria Ribeiro \_\_\_\_\_

## DEDICATÓRIA

À Deus, por se fazer presente em todos os momentos, por me guiar para os melhores caminhos, por ser sempre meu pastor e meu guardião.

À minha mãe, Maria de Fátima, a quem tenho enorme admiração e respeito, pela mulher maravilhosa e pela profissional respeitada e reconhecida que é. Por ser minha grande inspiração e minha eterna amiga e companheira. Amo você!

Aos meus avós, Homero e Sebastiana, meus “amorzinhos”, pelos quais tenho um amor sem palavras e que são essenciais na minha vida.

Aos meus tios Marcel e Silvana, dois grandes exemplos pra mim. Tenho por vocês grande admiração e um carinho imenso. Sou muito grata por tudo!

Ao meu tio Sandro, pelo apoio e carinho de sempre. Tenho também um carinho enorme por você.

À minha afilhadinha, Maria Laura, que mesmo tão pequenina encheu minha vida de alegria e amor.

Ao meu afilhado, Homero Neto, que tenho sempre a preocupação de me fazer presente mesmo estando longe.

À minha prima Sarah, por quem tenho um amor de irmã, que está ao meu lado me dando força e me apoiando sempre. E ao seu marido (primo de tabela), Douglas, por quem tenho um carinho enorme e sou grata pelo mesmo carinho que tem por mim.

Aos meus primos mais lindos, Leandro, Vítor e Caio. Obrigada pelo carinho de sempre.

À vocês dedico este trabalho!

## **AGRADECIMENTOS ESPECIAIS**

Ao Prof. Dr. Paulo César Simamoto Júnior, obrigada pela oportunidade de tê-lo como orientador e pela confiança depositada em mim. Tenho por você grande admiração, pelo professor, orientador e pesquisador competente que você é. Ser sua primeira orientanda foi uma responsabilidade grande, mas ao mesmo tempo uma tarefa gratificante, pois nos deu a oportunidade de um crescimento juntos. Obrigada por todas as oportunidades e desafios. Espero podermos continuar caminhando juntos.

À Profa. Dra. Veridiana Rezende Novais Simamoto, obrigada por toda a ajuda no desenvolvimento deste trabalho, pelo carinho e por toda boa convivência. Admiro e respeito você e, sobretudo confio muito no seu trabalho. Foi muito bom dividir com você e com o Paulo um momento tão especial das suas vidas. O Pedro é muito querido por todos, inclusive por mim.

Ao Prof. Dr. Cleudmar Amaral Araújo, obrigada por me receber com tanto carinho no Laboratório de Projetos Mecânicos Prof. Dr. Henner Alberto Gomide (LPM). O desafio de pesquisar em uma área diferente da minha formação foi grande, mas muito edificante. Obrigada por tantas oportunidades de crescimento. Ser membro do seu laboratório é motivo de muito orgulho para mim.

Ao Prof. Dr. Alfredo Júlio Fernandes Neto, por quem tenho um enorme respeito e admiração. Como professor, pesquisador e reitor da nossa Universidade, você é um exemplo a ser seguido. Que a vida recompense em dobro tudo o que fez e continua fazendo por nós.

Ao Prof. Dr. Flávio Domingues das Neves, obrigada pelas oportunidades e pelo exemplo que você é para todos nós. Confio muito no seu trabalho e nos seus ensinamentos e tenho por você uma grande admiração e respeito.

Ao Prof. Dr. Carlos José Soares, por quem tenho um carinho muito grande. Obrigada também pelas oportunidades e pelo jeito gentil e carinhoso que nos trata. Admirado e respeitado pelo seu vasto conhecimento científico e competência profissional, você será cada vez mais reconhecido.

Ao Prof. Dr. Darceny Zanetta Barbosa, por ser um profissional tão reconhecido, admirado e respeitado. Além de ser uma pessoa tão querida e cheia de vida. Obrigada por todo exemplo.

Aos Professores Doutores, Clébio Domingues da Silveira Júnior e Letícia Davi Rezende, por terem dividido comigo suas experiências clínicas, por me ensinarem tanto de prótese, pelo carinho e pela paciência. Tenho um carinho especial por vocês. Muito Obrigada!

Às Professoras Mestres, Cristiane Pacheco Ribeiro e Maria Aparecida de Oliveira Campoli, por que tenho um carinho mais que especial. Vocês são parte da minha história e espero que sejam sempre. Obrigada pela oportunidade de estar ao lado de vocês.

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

À Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia (FOUFU).

À Escola Técnica de Saúde da Universidade Federal de Uberlândia (ESTES/UFU).

À Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (FEMEC/UFU).

Ao Instituto de Biotecnologia Aplicada Periodontia e Implantodontia (INEB).

À HD Ensinos Odontológicos.

Ao Laboratório de Projetos Mecânicos Prof. Dr. Henner Alberto Gomide (LPM).

Ao Laboratório Integrado de Pesquisa Odontológica (LIPO).

Ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU).

Ao Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem (LAPROSOLDA).

Ao Laboratório de Prótese Fixa – ESTES-UFU.

Ao Laboratório de Prótese Removível da Faculdade de Odontologia de Piracicaba da Universidade Estadual de Campinas (FOP/UNICAMP).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Ao Programa de Pós-graduação em Odontologia da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Ao Prof. Dr. Américo Scotti, obrigada pela oportunidade de participar da disciplina de Soldagem no programa de pós-graduação em engenharia mecânica e por toda ajuda prestada neste trabalho.

Ao Prof. Dr. Henner Alberto Gomide, obrigada por desde a época da iniciação científica estar presente e me ensinar tanto. Tenho um carinho enorme e um respeito ainda maior pelo senhor.

À Profa. Sônia Goulart, obrigada por podermos dividir alguns bons e importantes momentos e pelo jeito sempre tão gentil de me tratar.



Ao Prof. Dr. Adérito, obrigada por transformar dias de estudos em algo mais divertido lá na “salinha” da prótese. Tenho carinho e respeito grande por você. Obrigada por tudo que me ensinou em tantos anos.

Ao Prof. Dr. Paulo Vinícius Soares, obrigada pelas oportunidades e toda ajuda prestada durante toda minha vida profissional. Tenho grande consideração e carinho por você.

Às professoras e amigas, Dra. Evonete Marra e Dra. Rosana Ono por tantos anos de convivência, carinho e admiração. Jamais vou me esquecer de agradecer-las pelo apoio que sempre encontro em vocês.

Aos professores Antônio Durighetto, Célio Prado, Denildo Magalhães, João Carlos Biffi, Paulo Quagliato, Priscila Soares, Sérgio Vitorino, Paula Dechichi, e demais professores da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia.

Ao Prof. Dr. Mauro Antônio de Arruda Nóbilo, da Faculdade de Odontologia de Piracicaba da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) pela contribuição direta a este trabalho.

Ao Prof. Dr. Sérgio Rocha Bernardes, do Instituto Latino Americano de Pesquisa e Ensino Odontológico (ILAPEO), pela contribuição em trabalhos desenvolvidos ao longo destes dois anos.

Aos amigos do Laboratório de Projetos Mecânicos, Alessandro, Artur, Fernando, Helton, Lidiane, Marcília, Márcio, Mateus, José Eduardo Neto e Sérgio, obrigada pelo carinho como me receberam no laboratório, por toda a ajuda prestada no desenvolvimento deste trabalho e por todos os momentos bons que pudemos compartilhar.

À Gabriela Menegáz, amiga, parceira, companheira, você foi essencial nesses dois anos. Obrigada por fazer parte da minha vida e por ser minha parceira de pesquisa. Espero que tudo que construímos nesses dois anos possa ser multiplicado nos próximos que virão. Afinal, temos muitos planos para o futuro. Obrigada de coração.

À Luísa Cavalcante, minha “irmãzinha”, por quem tenho enorme afeto. Você é muito especial. Uma amiga muito querida, uma parceira muito prestativa, que me ajudou muito neste último ano. Obrigada pelo carinho e por cuidar tanto de mim. Amo você!

Ao amigo e parceiro João Paulo Lyra, obrigada por estar ao meu lado sempre, pelo seu cuidado comigo, pela sua amizade, pela paciência, pelos bons conselhos e por ser parte tão importante deste trabalho. Meu muito obrigada!

Aos alunos de Iniciação Científica e graduação, Daniela Navarro, Fernanda Ladico, Flavinha, Maiara Coletto, Larissa Cunha, Leandro Maruki, Marina Naves, Polliana Martins, Rebeca e Ubiratan Júnior. Serei eternamente grata por toda a ajuda e carinho nestes dois anos. Contem comigo sempre que precisarem.

Às amigas, Analice, Andréa Lacativa, Euridsse Amade, Juliana Silvério e Kellen, obrigada por tudo. Mesmo quando ficamos tempos sem nos encontrar vocês estão guardadinhas em um lugar especial no coração. Obrigada por toda boa convivência nesses dois anos.

Às amigas, Fabiane Maria, Tatiane Gomes e Watuse Miranda. Obrigada por serem minhas amigas, minhas colegas de profissão, pessoas que eu confio, admiro e amo de verdade e por serem tão presentes nesses dois anos.

Aos amigos do mestrado, doutorado e pós-doutorado, Ana Luiza Serralha, Aline Bicalho, Aline Cristina, Bruno Barreto, Bruno Reis, Camila Christian, Cristiane Queiroz, Crisnicaw Veríssimo, Daniela Miyagaki, Danilo Maldonado, Dolores e Juan, Douglas Magalhães, Éverton Lelis, Fabiana Soares, Giovana Millito, George, Germana, Lorraine Vilela, Luiz Fernando Barbosa, João Paulo Netto, Lucas Dantas, Luís Raposo, Marcel Prudente, Marcos Bilharinho, Marcos Pains, Marina Majadas, Maiolino, Marina Roscoe, Mário Serra, Michelle Mundim, Rayssa Zannata, Roberta Rosa, Rodrigo Dantas, Talita Dantas, Talita Franco, Thais Christina Cunha, Thiago Carneiro e Vívian Oliveira. Todos vocês despertaram meu carinho e admiração. Obrigada pela convivência e amizade nestes dois anos. Desejo sempre muito sucesso à todos.

Aos amigos e colegas Luísa Cavalcante, Gabriela Menegaz, João Paulo Lyra, Mauro Paipa, Polliana Martins, Rodrigo Dantas e Ubiratan Gonçalves pela ajuda direta no desenvolvimento deste trabalho. Muito obrigada!

Aos amigos e professores do curso de Especialização em Implantodontia.

Aos meninos da CTBMF, Átila, Maiolino e Rodrigo Paschoal.

Às minhas amigas de infância e adolescência, Ana Paula Rende, Carla Milken, Dayane Spirandelli, Gabriela do Vale, Julia Ferro, Juliana Cassiano, Karine Gomes, Karla Mendonça, Luana Bastos, Luna Ferolla, Olívia Félix, Patrícia Lacerda, Soraia El Kadi, Samira El Kadi e Vanessa Carvalho. Obrigada pelo amor e amizade que nos une há tantos anos. Obrigada por me apoiarem tanto nesses dois anos. Amo muito vocês!

Ao meu primo e amigo, José Ricardo Guerra, você foi um presente maravilhoso. É coisa de Deus. Obrigada por todo amor, carinho e amizade nestes dois anos.

Ao amigo Heltinho, você é especial, um amigo querido e um parceiro de trabalho para toda hora. Obrigada por confiar no meu trabalho e na minha amizade.

À Ana Paula de Melo, obrigada por tudo. Se eu enxergo os melhores caminhos você tem uma boa responsabilidade nisso. Sem seus cuidados eu com certeza não conseguiria chegar até aqui.

À minha segunda família, Tia Cleide, Tio Marcelo, Ludmilla, Camilla e Marcelo Júnior, obrigada por poder partilhar com vocês esse momento tão importante. Obrigada pela força e exemplos nessa fase.

À técnica em prótese dentária, Érica, pelos ensinamentos dentro do Laboratório de Prótese Fixa da Escola Técnica de Saúde.

Aos técnicos em prótese dentária Cilson, Kênia e Takeu, pelo apoio e todos os ensinamentos nestes dois anos.

Ao técnico do Laboratório de Projetos Mecânicos (LPM), Valdico, pela ajuda na confecção dos corpos de prova e pela presteza em ajudar.

Às secretárias do setor de Implantodontia, Flaviane e Irene, vocês são uns amores, obrigada pelo carinho e por toda a ajuda.

Às secretárias da pós-graduação Aline e Graça, obrigada por toda a dedicação com que realizam seus trabalhos nos ajudando.

Aos secretários, Wilton e Suzy, obrigada pela atenção e auxílio nestes dois anos.

Aos alunos do curso de Prótese dentária da Escola Técnica de Saúde (ESTES), por esses dois anos de convivência e muito aprendizado.

Aos pacientes do projeto de extensão de prótese sobre implante, pela paciência e confiança no meu trabalho.

## **EPIÍGRAFE**

*“ E que seja permanente essa vontade de ir além de tudo aquilo que me espera”*

*Caio Fernando de Abreu*

## SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	pág. 15
LISTA DE FIGURAS.....	pág. 17
LISTA DE TABELAS .....	pág. 19
LISTA DE QUADROS .....	pág. 20
LISTA DE GRÁFICOS .....	pág. 21
LISTA DE FÓRMULA .....	pág. 22
RESUMO .....	pág. 23
ABSTRACT .....	pág. 24
1- INTRODUÇÃO .....	pág. 25
2- REVISÃO DE LITERATURA .....	pág. 27
2.1- Processos de soldagem .....	pág. 27
2.2- Titânio e suas ligas .....	pág. 30
2.3- Ensaios de resistência mecânica do Ti .....	pág. 31
2.4- Método dos Elementos Finitos (MEF) .....	pág. 49
3- PROPOSIÇÃO .....	pág. 51
4- MATERIAL E MÉTODOS .....	pág. 51
4.1 – Delineamento experimental .....	pág. 51
4.2 - Ensaio de resistência à tração .....	pág. 52
4.2.1 – Grupos estudados .....	pág. 52
4.2.2 – Confecção e preparo dos corpos de prova .....	pág. 53
4.2.3 – Processos de soldagem .....	pág. 55
4.2.4 – Ensaio de tração .....	pág. 57
4.2.5 – Percentual de alongamento.....	pág. 58
4.2.6 –Avaliação em Lupa estereoscópica .....	pág. 59
4.2.7 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) .....	pág. 60
4.2.8 – Análise estatística .....	pág. 61

4.3 – Análise pelo MEF.....	pág. 62
4.3.1- Definição da geometria do modelo experimental.....	pág. 62
4.3.2 – Confeção da malha do modelo.....	pág. 62
4.3.3 – Definição das propriedades mecânicas.....	pág. 63
4.3.4 – Condições de contorno e carregamento.....	pág. 64
4.3.5 – Análise das tensões no MEF .....	pág. 65
4.3.6 – Análise estatística dos dados do MEF .....	pág. 65
4.3.7 – Validação do modelo de EF .....	pág. 65
5 – RESULTADOS .....	pág. 66
5.1. Solda Plasma .....	pág. 66
5.1.1. Ensaio de resistência à tração, lupa estereoscópica e MEV.....	pág. 66
5.2. Solda Laser .....	pág. 72
5.2.1. Ensaio de resistência à tração, lupa estereoscópica e MEV.....	pág. 72
5.3 – Solda Plasma x Solda Laser .....	pág. 78
5.4. MEF .....	pág. 79
5.4.1. Controle .....	pág. 79
5.4.2. Solda Plasma .....	pág. 81
5.4.3. Solda Laser .....	pág. 82
6 – DISCUSSÃO .....	pág. 84
7 – CONCLUSÃO .....	pág. 92
8 – REFERÊNCIAS .....	pág. 92

## **Lista de abreviaturas e siglas**

Ti – Titânio

Al - Alumínio

V – Vanádio

Nb – Nióbio

cp – comercialmente puro

mm – milímetros

min – minuto

mm/min – milímetros/minuto

s - segundos

PL –Plasma

L - Laser

TIG – Tungstênio inert gas

AWS - American Welding Society

ASTM – American Society for Testing Materials

B – Brasagem

Kgf – Quilograma força

MPa – Megapascal

GPa - Gigapascal

N - Newton

ms – mili-segundos

A –Ampere

Hz - Hertz

V - Volts

O<sub>2</sub> - Oxigênio

Ar – Argônio

% - porcentagem

$\alpha$  – nível de confiabilidade

x - aumento

MEF – Método de Elementos Finitos

EF – Elementos Finitos

3D - tridimensional

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

ZAC – Zona Afetada pelo Calor



## Lista de Figuras

Figura 1 – Dimensões dos corpos de prova (ASTM E8) .....	pág. 54
Figura 2: a) Usinagem dos corpos de prova; b) Metades dos corpos de prova .....	pág. 54
Figura 3: a) Aparelho de ultrason; b) Amostras embebidas pelo álcool 99,5° dentro da cuba do aparelho .....	pág. 55
Figura 4: a) Aparelho de solda plasma Micromelt; b) Matriz para padronização da posição de soldagem; c) Aspecto final .....	pág. 56
Figura 5: a) Aparelho de solda laser Desktop; b) Aspecto final .....	pág. 57
Figura 6: a e b) Máquina de Ensaio mecânico MTS 810 .....	pág. 58
Figura 7: a) Computador acoplado à célula de carga; b) Curva força x deslocamento .....	pág. 58
Figura 8: a) Lupa estereoscópica; b) Exemplo de imagem gerada pela lupa estereoscópica e de como foram realizadas as medidas da área de penetração da solda no software .....	pág. 59
Figura 9: a e b) Amostras sendo seccionados próximos a área soldada; c) corpos de prova colados em <i>stubs</i> para serem submetido ao MEV.....	pág. 60
Figura 10 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de bancada .....	pág. 61
Figura 11: a) Corpo de prova intacto (grupo controle) e b) Corpo de prova soldado .....	pág. 62
Figura 12: a e b) Malha gerada dos corpos de prova intactos e soldados, respectivamente .....	pág. 63
Figura 13: Condições de contorno; a) Aplicação da força no eixo Z; b) Engastamento no lado contrário à aplicação na força também no eixo Z.....	pág. 64
Figura 14 – Curva Tensão x deformação para o grupo controle (experimental e MEF).....	pág. 66
Figura 15 - Imagens obtidas por meio de Lupa estereoscópica para os corpos de prova do grupo PL2.5 .....	pág. 69
Figura 16 – Imagens obtidas por meio de Lupa estereoscópica para os corpos de prova do grupo PL3 .....	pág. 69
Figura 17 – Imagens obtidas por meio de Lupa estereoscópica para os corpos de prova do grupo PL4 .....	pág. 70

Figura 18 – Imagens obtidas por meio de Lupa estereoscópica para os corpos de prova do grupo PL5 .....	pág. 70
Figura 19: a e b) Exemplos 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.....	pág. 71
Figura 20 – Imagens obtidas por meio de Lupa estereoscópica para os corpos de prova do grupo L2.5 .....	pág. 74
Figura 21 – Imagens obtidas por meio de Lupa estereoscópica para os corpos de prova do grupo L3 .....	pág. 75
Figura 22 – Imagens obtidas por meio de Lupa estereoscópica para os corpos de prova do grupo L4 .....	pág. 75
Figura 23 – Imagens obtidas por meio de Lupa estereoscópica para os corpos de prova do grupo L5 .....	pág. 76
Figura 24: 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.....	pág. 77
Figura 25 – Curva tensão x deformação para o grupo controle e para o MEF .....	pág. 80
Figura 26: a) Imagem representativa da deformação direcional no eixo Z e b) Imagem representativa da tensão máxima principal para os corpos de prova intactos .....	pág. 80
Figura 27 – Curva Tensão x deformação para o grupo controle e para o MEF .....	pág. 81
Figura 28: a) Imagem representativa da deformação direcional no eixo Z e b) Imagem representativa da tensão máxima principal para os corpos de prova intactos .....	pág. 82
Figura 29 – Curva Tensão x deformação para o grupo controle e para o MEF .....	pág. 83
Figura 30: a) Imagem representativa da deformação direcional no eixo Z e b) Imagem representativa da tensão máxima principal para os corpos de prova intactos .....	pág. 83

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 – Distribuição dos grupos estudados .....	pág. 53
Tabela 2 – Valores de resistência à tração (MPa) para solda Plasma .....	pág. 67
Tabela 3 – Porcentagem de alongamento (%) para solda Plasma .....	pág. 67
Tabela 4 – Porcentagem de área de solda (%) para solda Plasma .....	pág. 68
Tabela 5 – Valores de resistência à tração (MPa) para solda Laser .....	pág. 72
Tabela 6 – Porcentagem de alongamento (%) para solda Laser .....	pág. 73
Tabela 7 – Porcentagem de área de solda (%) para solda Laser .....	pág. 73
Tabela 8 – Comparação de médias $\pm$ desvio padrão da tensão máxima frente a tratamentos com solda laser e plasma com diferentes diâmetros sem o grupo controle .....	pág. 78
Tabela 9 – Comparação de médias $\pm$ desvio padrão da porcentagem de alongamento frente a tratamentos com solda laser e plasma com diferentes diâmetros sem o grupo controle .....	pág. 78
Tabela 10 – Comparação de médias $\pm$ desvio padrão da porcentagem de área de solda frente a tratamentos com solda laser e plasma com diferentes diâmetros .....	pág. 79

## **Lista de Quadros**

Quadro 1 – Composição da liga de Ti-6Al-4V .....	pág. 54
Quadro 2 – Número de nós e elementos de cada modelo .....	pág. 63
Quadro 3 – Propriedades mecânicas da liga de Ti-6Al-4V .....	pág. 64
Quadro 4 – Média das forças utilizadas na análise numérica .....	pág. 65

## **Lista de Gráficos**

Gráfico 1 – Tensão máxima para solda Plasma .....	pág. 67
Gráfico 2 - Porcentagem de área de solda para solda Plasma .....	pág. 68
Gráfico 3 – Tensão máxima para solda Laser .....	pág. 72
Gráfico 4 – Porcentagem de área de solda para solda Laser .....	pág. 74

## **Lista de Fórmula**

Fórmula 1 – Fórmula do percentual de alongamento ..... Pág. 59

## RESUMO

Há poucas informações na literatura existente sobre soldagem plasma e laser em barras pré-fabricadas de Ti-6Al-4V em diferentes diâmetros, portanto o objetivo deste trabalho foi avaliar a resistência mecânica de liga de Ti-6Al-4V em diferentes diâmetros (2.5, 3, 4 e 5 mm) submetidas a distintos processos de soldagem: plasma e laser, por meio de ensaio de tração e modelos tridimensionais de Elementos Finitos (EF). Foram confeccionadas 45 amostras e divididas 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 corrente de 10 A e pulso de 3 ms e o laser com voltagem de 365 V e pulso de 9ms com foco e frequência calibrados em zero. As amostras foram submetidas ao ensaio de tração até a ruptura e os valores de porcentagem de alongamento foram obtidos. 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 de bancada nos aumentos de 500 e 1200x. Os resultados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) sendo posteriormente aplicados os testes de Dunnett para comparação dos grupos testados com o grupo controle e Tukey para comparação de médias dos grupos experimentais. Testes de correlação de Pearson e Spearman's foram aplicados para comparação dos parâmetros analisados. Os modelos de EF foram desenvolvidos em ambiente Workbench com condições de contorno simulando um ensaio de tração. Analisando a tensão máxima e a porcentagem de área soldada, observou-se que houve diferença estatística entre os grupos experimentais. Praticamente todas as amostras fraturaram na região de união de solda, apenas uma amostra do grupo L2.5 fraturou no metal base. O grupo controle apresentou maiores valores de tensão máxima que os grupos experimentais. Analisando a porcentagem de alongamento, houve diferença estatisticamente significativa entre o grupo controle e os grupos experimentais, mas não entre os grupos experimentais. Houve correlação positiva entre a porcentagem de área soldada e a tensão máxima em todas as amostras dos grupos experimentais e correlação negativa entre esses parâmetros e o diâmetro das amostras. Não houve diferença estatisticamente significativa entre os dois tipos de solda dentro de cada diâmetro. Concluiu-se que os diâmetros de 2.5 mm e 3.0 mm parecem ser a melhor opção para união de barras pré-fabricadas para emprego em estruturas protéticas, tanto para solda plasma quanto para solda laser, e que o equipamento de solda plasma parece ser uma alternativa ao equipamento de solda laser, não apresentando diferenças estatísticas entre si para cada diâmetro.

**Palavras chaves:** Titânio, Soldagem, Ligas odontológicas, Resistência à tração, Método dos elementos Finitos.

## ABSTRACT

There is limited information in existing literature regarding the accomplishment of Ti-6Al-4V joints plasma and laser welded in prefabricated bars in different diameters. Therefore the aim of this study was evaluate the mechanical resistance of Ti-6Al-4V alloy in different diameters (2.5, 3, 4 e 5 mm) submitted to the processes of plasma and laser welding by means of tensile test and Finite Element Models. Forty-five dumbbell-shaped rods ( $n=5$ ) with central diameters of 2.5, 3, 4 and 5 mm were created from Ti-6Al-4V prefabricated bars: CG (Control group) with 3 mm diameter, constituted by intact bars and PL2.5, PL3, PL4 and PL5 groups with 2.5, 3, 4 and 5 mm diameters submitted to plasma welding process and L2.5, L3, L4 and L5 groups with 2.5, 3, 4 and 5 mm diameters submitted to laser welding process. The plasma welding process was executed using current of 10 A and pulse of 3 ms and laser welding was executed using voltage of 365 V e pulse of 9 ms and the focus and frequency were calibrated at 0. The specimens were tested for tensile strength test until fracture and the percentage of elongation was obtained. Fractured samples were analyzed in stereomicroscope and the welded areas percentage was calculated. The most representative images were taken by tabletop scanning electron microscope in increases of 500 and 1200x. The results were evaluated by analysis of variance (ANOVA) and subsequently using Dunnett test to compare test groups to control group and the Tukey test to compare means of the test groups. Pearson and Spearman's correlation tests were applied for comparison of the parameters analyzed. The finite element models were developed in a Workbench environment with boundary conditions simulating a tensile test. Analyzing the tensile strength and the welded area percentage there were statistical difference between groups ( $P > .05$ ). Most of specimens of the test groups were fractured on the welded area. The control group showed higher values to tensile strength than test groups. Analyzing the percentage of elongation there was statistical difference between control group and test groups but not between test groups. There was a positive correlation between welded area percentage and tensile strength in all the specimens in the test groups and a negative correlation between these parameters and the diameters of the specimens. It was concluded that the diameter of 2.5 mm and 3.0 seem to be the best option for joining prefabricated rods for use in prosthetic frameworks for both plasma and laser welding, and the plasma welding seems to be an alternative of laser welding equipment, presenting no significant statistical differences between them for each diameter.

**Keywords:** Titanium; Dental Soldering; Dental Alloys; tensile strength; Finite Element Method.



## 1- INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo que visa a união localizada de materiais, similares ou não, de forma permanente, baseada na ação de forças em escala atômica semelhantes às existentes no interior do material. Existem basicamente dois grandes grupos de processos de soldagem. O primeiro baseia-se no uso de calor, aquecimento e fusão parcial das partes a serem unidas, e é denominado processo de soldagem por fusão. O segundo baseia-se na deformação localizada das partes a serem unidas, que pode ser auxiliada pelo aquecimento dessas até uma temperatura inferior à temperatura de fusão, conhecido como processo de soldagem por pressão ou processo de soldagem no estado sólido (American Welding Society - AWS; Marques *et al.*, 2007).

Atualmente mais de 50 diferentes técnicas 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; Tiossiet *et al.*, 2010).

Além disso, o uso das ligas de titânio (Ti) na odontologia foi 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) quando comparado à outras ligas de uso odontológico.

No entanto, sua alta temperatura de fusão, próxima 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).

Embora a qualidade do ponto de solda seja um fator importante na determinação da resistência da ligação de estruturas odontológicas os parâmetros dimensionais também são de grande influência. Contudo, há a inexistência de um padrão ouro para construção de estruturas soldadas pela técnica plasma, bem como critérios de aceitação e procedimentos testes. Fato que dificulta a correlação de outros trabalhos a fim de somar conhecimento no aprimoramento das técnicas de soldagem.

Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi avaliar a resistência mecânica da 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 soldaplasma pode ser utilizada como uma alternativa à solda laser e que o aumento do diâmetro influenciará positivamente nos valores de resistência.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### *2.1. Processos de soldagem*

A técnica de soldagem envolve processo de união metalúrgico que se baseia na fusão do metal de base, ou seja, o metal constituinte da estrutura, com ou sem metal de adição, para a formação da união soldada (Wang & Welsch, 1995; Tambasco *et al.*, 1996; Wang & Chang, 1998). Assim, uma definição, meramente operacional, proposta pela AWS é “operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem aplicação de pressão e de metal de adição (Marques *et al.*, 2007), produzindo peças com uniões soldadas fortes, não porosas e sem corrosão (Byrne, 2011).

Comparando-se a soldagem à fundição, como processo de fabricação, constata-se que a soldagem apresenta características interessantes, como: possibilidade de se ter grandes variações de espessura na mesma peça e inexistência de uma espessura mínima para adequado preenchimento do molde com o metal fundido, possibilidade de se usar diferentes materiais numa mesma peça, de acordo com as solicitações de cada parte e maior flexibilidade em termos de alterações no projeto da peça (Marques *et al.*, 2007).

As soldagens convencionais ou brasagem têm sua aplicação sustentada há anos, devido ao baixo custo e relativa efetividade. Para AWS, o processo de brasagem também

chamado de oxigás ou soldagem por chama direta, produz a coalescência dos metais pelo aquecimento das partes a serem soldadas por meio de uma chama, havendo a necessidade de outro tipo de liga chamada de liga de solda, que serve para unir entre si duas ou mais peças metálicas, seja do mesmo metal ou não a uma temperatura maior que 450°C e menor que o ponto de fusão do metal base.

No entanto, problemas como oxidação das faces unidas pela solda, porosidade na junta e superaquecimento do local de união durante o processo podem promover pequenos defeitos estruturais e posteriormente fracasso do tratamento reabilitador (Tehini & Stein, 1993; Silva, 2007). Diante destas limitações, pesquisas surgiram neste campo gerando novas tecnologias e técnicas alternativas de soldagem, como as soldagens a arco elétrico (soldagem plasma e TIG – Tungsten Inert Gas) e soldagem a Laser.

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 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, na solda plasma, que causa a concentração do arco elétrico (Marques *et al.*, 2007).

A soldagem laser é largamente usada nos campos da indústria aeroespacial, aviação e automobilística, em virtude da sua alta velocidade de soldagem, alta penetração, fácil manuseio e alta exatidão(Choet *et al.*, 2003).

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; Srimaneeponget *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; Srimaneeponget *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; Srimaneeponget *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 das partes soldadas e causar a falha prematura da estrutura (Maques *et al.*, 2007).

## 2.2. Titânio e suas ligas

Nos anos 70, com o aumento do preço do ouro, até então principal material utilizado nas estruturas de próteses fixas e removíveis, foram introduzidas ligas alternativas de menor custo, a exemplo, ligas contendo níquel, berílio e cobalto na sua composição. Com o passar dos anos, têm sido reportadas questões importantes em relação à capacidade alergênica do níquel ou o poder carcinogênico do berílio, o que leva à constante busca por materiais biocompatíveis que atendam aos requisitos odontológicos nos aspectos químicos, físicos, estéticos e econômicos (Wataha, 2000).

Assim sendo, a utilização do Ti na odontologia vem crescendo nas últimas décadas (Roggensack *et al.*, 1993; Berg *et al.*, 1995; Wang & welsch, 1995; Neo *et al.*, 1996; Chai & Chou 1998; Taylor *et al.*, 1998; Watanabe *et al.*, 2000; Rocha et al., 2006; Srimaneeponget *al.*, 2008) em virtude das suas propriedades físicas, mecânicas e biológicas favoráveis tais como: baixa densidade, excelente biocompatibilidade, resistência à corrosão, boa relação resistência/peso, baixa condutividade térmica; baixo coeficiente de expansão térmica 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), quando comparadas a outras ligas de uso odontológico.

Entretanto, muitos problemas práticos estão associados ao uso do Ti e suas ligas em virtude do alto ponto de fusão, necessitando de altas temperaturas de processamento uma vez que a temperatura de fusão do Ti aproxima-se de 1700° C (Blackman *et al.*, 1992; Wang & Welsch, 1995) e sua alta reatividade química com os elementos oxigênio, nitrogênio e hidrogênio especialmente sob altas temperaturas (Wang & Welsch, 1995; Liu *et al.*, 2002) que tornam o Ti frágil, visto que concentrações significativas desses elementos são introduzidas na sua camada superficial. A contaminação com estes elementos durante o processo de união do Ti e suas ligas pode resultar na alteração da microestrutura apresentando profundos efeitos nas suas propriedades mecânicas (Berg *et al.*, 1995; Wang & Welsch, 1995; Taylor *et al.*, 1998).

Dessa forma, métodos convencionais de solda que usam a chama de oxigênio são inadequados para serem usados para a soldagem do Ti (Taylor *et al.*, 1998). Soldagem TIG, Laser e Brasagem por Radiação Infravermelha são técnicas que têm sido usadas para união de metais com proteção gasosa, minimizando a contaminação por oxigênio durante o processo de soldagem e preservando as propriedades originais do metal (Wang & Welsch, 1995).

### *2.3. Ensaios de resistência mecânica em solda de titânio*

Os primeiros estudos com solda laser foram publicados por Gordon & Smith, em 1970 em que os autores descrevem abordagens básicas, experiências e vantagens da soldagem a laser de próteses fixas parciais e próteses parciais removíveis de precisão. No estudo, os pesquisadores variaram os níveis de energia entre 6 e 12 joules e pulso de 4 ms (estudos iniciais) e 8 ms e encontraram relação crítica entre energia e tamanho do ponto de solda, o que determinaria a obtenção de uma superfície plana ou uma concavidade no metal de espécimes

de 1mm de espessura. Desta forma, variando o tamanho do ponto de solda obtinham controle satisfatório do efeito de derretimento do metal, sem produção de concavidades. Em seguida, foram realizados testes em coroas de molares fundidas em ouro tipo III, obtendo soldagem satisfatória.

O emprego da solda a laser para próteses fixas e removíveis de precisão se deu a partir de dezembro de 1968 com próteses parciais fixas de 4 elementos. A soldagem da prótese fixa de quatro elementos foi realizada no próprio modelo, observando que não houve danos ao mesmo, foram necessários alguns pontos de solda sobrepostos para o derretimento uniforme do metal e um acabamento fino foi realizado de forma a remover o mínimo de metal.

Em um estudo com 19 pacientes, envolvendo 104 próteses fixas e 3 removíveis foi utilizado este método, entretanto no caso das removíveis de precisão, o componente macho do encaixe foi soldado à estrutura da removível, constatando após o procedimento de solda, ausência de danos à resina do dente pilar. Os resultados mostraram que a penetração do laser foi superior a 1mm em todas as amostras submetidas a solda laser e nenhuma das estruturas falhou em condições normais de uso e que nenhuma restrição foi imposta aos pacientes em um período de 6 a 20 meses. Segundo os autores, a solda laser proporcionou à odontologia uma nova técnica para união de metais de forma rápida, econômica e precisa. As vantagens do uso da solda laser incluem: soldagem no próprio modelo de trabalho, causando menor distorção na peça e dispendendo menor tempo de trabalho; força de união da solda compatível com o metal de origem; preservação da anatomia da infraestrutura metálica e não há nenhum dano na resina ou porcelana próxima à área de soldagem.

Sjögren *et al.* (1988), avaliaram algumas propriedades mecânicas do Ti soldado a laser, como resistência à tração, resistência à flexão a 0,2% e porcentagem de alongamento.



Utilizaram amostras de Ti de 2.0 e 5.0 mm de diâmetro e 70 mm de comprimento. Foram confeccionadas 56 barras, sendo 16 para o grupo controle, ou seja, intactas (8 de cada diâmetro); das restantes, 8 barras de 2 mm e 32 barras de 5 mm de diâmetro foram seccionadas em duas partes iguais de 35 mm de comprimento e unidas por meio de soldagem a laser, realizada em atmosfera de gás argônio. Os parâmetros de soldagem para as amostras de 2.0 mm de diâmetro foram: nível de energia de 15 J, pulso de 5 ms e frequência de 10 Hz; para as amostras de 5.0 mm variou-se o nível de energia, a duração do pulso e a frequência do pulso, obtendo-se 4 parâmetros de soldagem (8 amostras cada): A- 12 J/ 6 ms/ f 10 Hz; B- 18 J/ 6 ms/ f 10 Hz; C- 18 J/ 6 ms/ f 5 Hz; D- 30 J/ 10 ms/ f 3 Hz. Para comparação, 8 amostras fundidas em ouro tipo III, de 5.0 mm de diâmetro foram soldadas por brasagem e ensaiadas da mesma forma que as de Ti. As amostras fraturaram na região central da solda durante o ensaio de resistência à tração; aquelas fundidas em ouro fraturaram na região da brasagem e as amostras controle de Ti fraturaram aproximadamente na região central. A fractografia mostrou que o grau de deformação na região fraturada foi maior nos corpos não soldados. Em geral, o mecanismo de fratura ocorrido nas amostras controle e nas soldadas apresentou características similares (presença de *dimples* ou ondulações características de ductilidade), entretanto, as amostras soldadas apresentaram presença de poros e falhas. As amostras de Ti do grupo controle apresentaram maiores valores de alongamento, quando comparadas às amostras soldadas; dentre as amostras submetidas à soldagem, as de maior diâmetro (5.0 mm) apresentaram menores valores de resistência à tração (redução de 30%) devido à menor velocidade de esfriamento, acarretando em microestrutura mais grosseira. Os resultados mostraram que o parâmetro determinado para as amostras de 2.0 mm e os parâmetros A e B, para as amostras de 5.0 mm foram os mais adequados em termos de valores de resistência e profundidade de penetração da solda.

Roggensack *et al.* (1993), avaliaram a viabilidade das técnicas de soldagem laser e plasma em amostras de Ti cp sendo que as amostras para o grupo da solda laser foram colocadas em um modelo de forma a ficarem topo-a-topo e as amostras do grupo da solda plasma com um *gap* de 500 $\mu$  e uso de metal de adição. Estas foram submetidas aos ensaios de dureza Vickers e de Fadiga. Avaliação microestrutural foi feita por meio de MEV. A MEV mostrou que a zona de solda, nas amostras soldadas a laser, não se apresentava completamente fundida, sendo que a profundidade de solda alcançada foi de 0.7 mm. Nestas, alterações na estrutura do metal se limitaram à zona de solda. As amostras soldadas com plasma exibiram maior ZAC, superior a 3 mm. Porém, não foi observada presença de porosidades ou trincas no cordão de solda. Em ambos os métodos, a dureza do metal aumentou na região da solda, sendo estatisticamente significativa. Os resultados do ensaio de fadiga mostraram que os procedimentos de soldagem diminuíram em cerca de 40% a resistência do material, quando comparado às amostras controle. Segundo os autores, a diferença encontrada nas propriedades das amostras em cada procedimento pode ser explicada pela duração de cada processo: o método da solda por Plasma acarreta maior área afetada pelo calor, devido ao processo longo e contínuo de soldagem; o contrário ocorre na solda a laser, que limita ao mínimo a área afetada pelo calor. O aumento da dureza pode ter ocorrido devido às impurezas captadas durante a soldagem e esfriamento do Ti. Ambos os métodos mostraram-se adequados para a união do Ti para odontologia.

Berg *et al.* (1995), avaliaram as propriedades mecânicas do Ticp fundido e pré-fabricado intactos e soldados a laser, comparando-os com amostras fundidas em liga de ouro (tipo IV) soldadas por brazagem. Foram confeccionadas 13 amostras (32 mm de comprimento e 2.5 mm de diâmetro) para cada grupo, totalizando 39 amostras. As amostras foram posicionadas em um dispositivo de padronização e alinhadas para que pudessem ser

seccionadas ao meio com disco de *carborundum*. As amostras seccionadas foram colocadas topo-a-topo no dispositivo para que pudessem ser soldadas com solda laser e as metades submetidas à brasagem foram separadas em 0.5mm. A soldagem a laser foi realizada com nível de energia de 20J, entretanto algumas estruturas apresentaram-se frágeis, fraturando quando colocadas na máquina de ensaio, os autores atribuíram isso ao alto nível de energia e então confeccionaram 5 corpos de prova para cada grupo e soldaram com nível de energia de 15J. A brasagem foi realizada utilizando um metal de adição com ponto de fusão abaixo do ponto de fusão da liga de ouro para preencher o *gap* de 0.5mm. As amostras foram submetidas ao ensaio de tração com velocidade de 0.5mm/min e os valores de resistência à tração, limite de escoamento e alongamento foram registrados pela máquina no momento do ensaio. Os resultados mostraram que quanto à resistência à tração, o Ti fundido, o pré-fabricado e o ouro soldado por brazagem apresentaram valores menores (entre 25 e 58%) que a liga de ouro intacta; além disso, não houve diferença entre Ti fundido e pré-fabricado. Padrões similares foram observados para resistência ao escoamento. A ductilidade das amostras intactas de Ti pré-fabricado foi duas vezes maior do que das amostras intactas de liga de ouro e de Ti fundido e todas as amostras soldadas apresentaram ductilidade menor que as amostras intactas, embora algumas dessas diferenças não fossem estatisticamente significantes. Nas imagens MEV observou-se nas regiões de fratura grande variedade do comportamento das amostras para a ductilidade e o tipo de falha mais comum foram as frágeis com presença de bolhas e poros para as amostras soldadas. Segundo os autores, a fratura muito provavelmente ocorreu nessas regiões.

Wang & Welsch (1995) analisaram a qualidade, as características metalúrgicas, e as propriedades mecânicas de Ti cp e de liga de Ti-6Al-4V, por meio de ensaios mecânicos e avaliação micro-estrutural. Os ensaios mecânicos utilizados foram: dureza Vickers, resistência

à tração e alongamento. Foram utilizadas amostras de 3 mm de diâmetro e 40 mm de comprimento usadas em Ti cp e de liga de Ti-6Al-4V unidas por três diferentes processos: solda a laser, solda TIG, e brasagem com radiação infravermelha. Para cada grupo experimental 16 barras cilíndricas de Ti foram unidas em suas extremidades em oito amostras. O mesmo número de barras de tamanho idêntico de liga de Ti-6Al-4V foram unidas para comparação. Barras de Ti e de liga de Ti-6Al-4V intactas (80 mm de comprimento e 3 mm de diâmetro) foram utilizadas como controle. A soldagem a laser foi realizada utilizando-se nível de energia de 18J, pulso de 12ms e frequência de 10Hz. Para a soldagem TIG a máquina foi calibrada para trabalhar com corrente de 10A e pulso de 3ms. A brasagem com Radiação Infravermelha foi realizada com corrente de 15A e 3 segundos de aquecimento e uma liga de Ti-20Pd-10Cu foi utilizada como metal de adição. As amostras foram submetidas ao ensaio de resistência à tração com velocidade de 0.5mm/min até a ruptura. Os valores de resistência à tração e alongamento foram registrados pela máquina. As superfícies fraturadas foram examinadas por meio de fractografia e MEV. As amostras de liga de Ti-6Al-4V apresentaram significativamente maior resistência à tração do que as amostras de Ti cp, independentemente do método de soldagem utilizado. Todas as amostras soldadas foram significativamente mais fracas do que as barras de metal intactas; o grupo controle do Ti cp teve a maior média de resistência à tração, seguido pelo de solda TIG, solda laser, e brasagem com radiação infravermelha; o grupo controle de Ti cp obteve maior alongamento na falha, e o grupo da brasagem com radiação infravermelha tiveram os menores valores de alongamento; os valores de microdureza foram significativamente maiores na ZAC tanto para o Ti cp quanto para a liga de Ti-6Al-4V para os três métodos testados. Estes aumentos são devidos às mudanças que ocorrem na microestrutura e na absorção e difusão de oxigênio na camada de superfície aquecida. A análise fotográfica revelou que o tamanho do grão na zona afetada pelo calor das

amostras de solda à laser foi muito menor do que o da solda TIG e brasagem com radiação infravermelha, esta conclusão é resultado do pouco tempo de intervalo que o material submetido à solda à laser passa a altas temperaturas. AMEV indicou ainda falha coesiva de todas as amostras de brasagem. Para brasagem com radiação infravermelha, algum grau de ductilidade foi indicado na superfície de fratura das amostras de solda TIG e a maior parte da seção transversal de todas as juntas soldadas a laser não foi fundida.

Neo *et al.* (1996), avaliaram as propriedades mecânicas do Ti soldado a laser e soldado com a técnica do gás tungstênio (GTAW) ou TIG, comparando com o metal intacto. Além disso, avaliaram o efeito do tratamento térmico pela simulação da aplicação de porcelana. Amostras de Ti cp (grau 2) em forma de algariscos (3 mm de diâmetro e 18 mm de comprimento) foram confeccionadas (n=60) e divididas em 3 grupos: G1- controle sem solda; G2- solda a laser, e G3- solda GTAW. Metade das amostras de cada grupo foram submetidas ao tratamento térmico. Realizou-se ensaio de resistência à tração com velocidade de 1 mm/min, que forneceu informações sobre resistência à tração, resistência ao escoamento a 0,1%, módulo de elasticidade e porcentagem de alongamento. As amostras soldadas (Laser ou GTAW) apresentaram valores de resistência à tração maiores que o grupo controle. Porém, quando submetidas ao tratamento térmico, os valores diminuíram; o mesmo ocorreu para resistência ao escoamento a 0,1%, e módulo de elasticidade. Os resultados de porcentagem de alongamento mostraram que as amostras soldadas com ou sem tratamento térmico apresentaram valores muito inferiores ao grupo controle. A profundidade alcançada da solda foi 0.7 mm. Segundo os autores, o tratamento térmico causa diminuição da flexibilidade. A alta velocidade de esfriamento associada à baixa voltagem da solda a laser resultou na formação de estruturas  $\alpha$ -martensíticas, conhecidas pela maior resistência à tração, resistência ao escoamento e dureza. Entretanto, esta estrutura apresenta pobre flexibilidade constatada

nos menores valores de porcentagem de alongamento. No caso das amostras soldadas pelo GTAW, a lenta velocidade de esfriamento causou a formação de estruturas  $\alpha$ -widmanstätten, que apresentam melhor resistência à tração e ao escoamento que o titânio controle e maior flexibilidade que a estrutura martensítica. Os autores concluíram que as propriedades mecânicas do titânio soldado apresentaram-se semelhantes ao metal intacto.

Chai& Chou (1998), avaliaram as propriedades mecânicas do Ti cp soldado à laser sob diferentes condições para determinar os melhores parâmetros de soldagem em termos de duração e voltagem. Foram confeccionados 57 corpos de prova em formato de alteres em Ticp de acordo com a norma ISO 6871 e divididos em 9 grupos experimentais e um controle. As amostras foram seccionadas ao meio, as metades dos corpos de prova dos grupos experimentais foram unidos por meio de um dispositivo metálico que permitia a padronização da posição de soldagem com as partes a serem soldadas o mais próximo possível e então soldadas com solda à Laser sob diferentes parâmetros quanto à duração e voltagem (8, 10, 12 ms X 290, 300, 310 V). As amostras foram avaliadas por meio de ensaio de resistência à tração, escoamento à 0,2% e porcentagem de alongamento. Houve diferença estatisticamente significativa para o parâmetro resistência à tração dentro do fator voltagem entre os grupos soldados com 290 V e os grupos de 300 e 310 V; não houve diferença estatisticamente significativa dentro do fator pulso para os grupos experimentais e não houve entre os fatores voltagem e pulso, levando à conclusão de que a voltagem é o único fator que afeta os valores de resistência à tração. As médias dos valores de porcentagem de alongamento para o grupo controle foram maiores do que as médias dos grupos experimentais e os testes estatísticos revelaram que para o parâmetro alongamento não houve interação entre voltagem e pulso e que o único fator significativo para este também foi a voltagem. Três amostras dos grupos experimentais com diferentes voltagens que fraturaram na região de solda e uma

amostra fraturada do grupo controle foram levadas ao MEV. A análise fractográfica mostrou que no grupo controle havia característica de ductibilidade (presença de *dimples* ou ondulações características de materiais dúcteis) e que as amostras dos grupos experimentais apresentaram característica de uma fratura frágil com presença de ondulações mas com partes mais planas.

Taylor *et al.* (1998), avaliaram a resistência à tração e as propriedades de amostras em formato de alteres fundidas em liga de Ti-6Al-4V, soldadas pelo processo TIG em quatro diferentes *gaps* (0.25, 0.50, 0.75, 1.00 mm). As amostras soldadas foram submetidas ao ensaio de resistência à tração em máquina de ensaio mecânico com velocidade de 0.05 cm/min e as amostras fraturadas foram analisadas em MEV. Os valores de resistência à tração variaram entre 974.7 MPa para a distância de 0.5mm e 1010.5 MPa para as amostras do grupo controle. A análise estatística revelou que não houve diferença estatística significativa entre os grupos. As porcentagens de alongamento variaram entre 5.03% para a distância de 0.75mm e 6.67% para o grupo controle. A análise estatística revelou que houve diferença estatística significativa entre os grupos. Como não mais do que três amostras em cada grupo (n=10) fraturaram na região de solda, uma nova análise estatística sucedeu dividindo-os em três novos grupos: controle, fraturados na área soldada e fraturados no metal base. A nova análise estatística revelou que houve diferença estatística entre os grupos e que os menores valores foram para o grupo das amostras que fraturaram na área de solda e os maiores valores foram para o grupo controle, tanto para a resistência à tração quanto para a porcentagem de alongamento. As amostras fraturadas observadas em MEV demonstraram um comportamento mais frágil com uma superfície relativamente mais plana.

Liu *et al.* (2002), avaliaram a força de união do Ti cp soldado a laser, utilizando diferentes níveis de voltagem, variando de 180 a 300 A, aumentando em incrementos de 30 A.

Amostras de Ti (0.5 x 3.0 x 40 mm e 1.0 x 3.0 x 40 mm) foram confeccionadas e seccionadas perpendicularmente na região central. As metades foram fixadas e soldadas a laser. Amostras de titânio intactas, nas mesmas dimensões foram utilizadas como grupo controle. Foi realizado ensaio de resistência à tração, com velocidade de 2 mm/min, no qual o valor registrado correspondia ao momento da fratura da amostra, em N. Após a fratura, as amostras foram observadas em MEV e com aumento de 32 X, a fim de correlacionar o tipo de fratura com o valor da força de resistência à tração obtido. As fraturas foram classificadas em três categorias: fratura dentro da área soldada (A), entre o ponto de solda e o metal base (B) e somente no metal base (C). As amostras de 0.5 mm de diâmetro, quando soldadas com 240, 270 e 300 A não apresentaram diferença na força de resistência à tração quando comparadas ao grupo controle. Entre as amostras de 1.0 mm de diâmetro, não houve diferença em relação ao grupo controle quando soldadas com 270 e 300 A. Os autores concluíram que sob condições apropriadas, a força de união da soldagem apresenta-se similar às estruturas intactas. A penetração da solda foi mais eficiente, utilizando diâmetro do ponto de solda entre 0.4 e 1.0 mm e duração do pulso de 10 ms. A MEV mostrou a presença de bolhas e poros nas regiões de solda laser e para os grupos controles a presença de *dimples*, característicos de ductibilidade estes foram maiores para os corpos de prova de 1.0mm do que para os corpos de prova de 0.5mm.

Zavanelli *et al.*(2004), avaliaram a resistência à fadiga e corrosão de amostras confeccionadas em Ti cp e liga de Ti-6Al-4V submetidas à soldagem a laser. Foram confeccionadas 33 amostras de cada metal, em forma de alteres (2.3 x 40 mm). Para simular a condição clínica de esforço contínuo, foi realizado ensaio de fadiga, sendo as amostras divididas em três grupos: ciclagem mecânica imersa em solução de saliva artificial; solução de saliva artificial fluoretada e sem imersão. Após a fratura, as amostras eram reposicionadas



e unidas por meio de soldagem a laser com voltagem de 300 V, pulso de 10 ms e frequência em 0 Hz e novamente submetidas ao ensaio de fadiga nas mesmas condições citadas, até a fratura. As superfícies das fraturas foram observadas em MEV. O número de ciclos necessários para a fratura foi comparado entre as amostras intactas e soldadas. Os resultados mostraram que houve diferença significativa entre amostras intactas e soldadas (11060 e 6145 ciclos respectivamente); quanto às condições do ensaio houve diferença significativa entre “ar” e as soluções de saliva, entretanto, não houve diferença entre a solução sem flúor e a solução com flúor (16186, 5674 e 3948 respectivamente). A observação em MEV constatou defeitos internos na solda, sugerindo inadequada penetração do laser, sendo considerado o mais importante fator na resistência da união. A resistência à corrosão do titânio está na dependência da estabilidade da camada superficial de óxido, sendo demonstrado que a presença de íons flúor prejudica esta proteção.

Baba & Watanabe (2004), investigaram os efeitos das condições de soldagem a laser (voltagem (V) e diâmetro do ponto de solda (mm)) sobre a profundidade de penetração da solda no titânio comercialmente puro e nas ligas de Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb, Co-Cr e ouro tipo IV. Segundo os autores, a profundidade de penetração é um dos principais fatores que afetam a força de uniões soldadas a laser em próteses, pois quanto maior a profundidade de penetração, maior a área de solda. Para tanto, foram confeccionadas amostras fundidas com diâmetros de (3 x 8 x 50 mm) dos metais selecionados e submetidas a soldagem com os seguintes parâmetros: voltagem de 160 a 340 V (incrementos de 20 V); diâmetro do ponto de solda de 0,4 a 1,6 mm (incrementos de 0,2 mm) e duração do pulso de 10 ms. Após a soldagem, as amostras foram separadas mecanicamente e a mensuração da profundidade de penetração foi realizada. A profundidade da penetração da solda foi medida na superfície interna da região partida (distância vertical da superfície do metal até o ponto mais profundo

da solda). Os resultados mostraram que a profundidade variou de acordo com as combinações de voltagem e diâmetro do ponto (o máximo conseguido foi de 1,0 mm). Quando foi utilizada maior voltagem e menor diâmetro do ponto de solda, a profundidade aumentou para todos os metais. Assim, a correta calibração do equipamento é importante nos processos de soldagem a laser. Entretanto, a profundidade de penetração do laser com a mesma energia em cada metal depende das propriedades do metal como condutibilidade térmica e taxa de absorção do feixe de laser.

Botega (2005), avaliou a resistência à tração e alongamento de amostras de diferentes diâmetros (1.5, 2.0 e 5.0 mm) fundidas em Ti CP, submetidas a soldagem a laser em diferentes *gaps* (0.0 mm e 0.6 mm). Foram confeccionadas 45 amostras, separadas em 9 grupos (n= 5): G1) diâmetro 1.5 mm controle (não submetidas à soldagem); G2) diâmetro 1.5 mm e distância zero; G3) diâmetro 1.5 mm e distância 0.6 mm; G4) diâmetro 2.0 mm (controle); G5) diâmetro 2.0 mm e distância zero; G6) diâmetro 2.0 mm e distância 0.6 mm; G7) diâmetro 5.0 mm (controle); G8) diâmetro 5.0 mm e distância zero; e G9) diâmetro 5.0 mm e distância 0.6 mm. Após a fundição, todas as amostras, exceto as dos grupos controle, foram seccionadas e unidas, utilizando-se resina acrílica autopolimerizável, para a soldagem com as seguintes especificações: 320V / 9 (ms) (amostra de 1.5mm), 330V / 9 ms (amostra de 2.0mm) e 350V / 9 ms (amostra de 5.0mm). Após a soldagem, foram submetidas ao ensaio de resistência à tração até a ruptura com velocidade de 1mm/min. As superfícies de fratura foram analisadas em MEV. Os valores médios de resistência máxima à tração (MPa) revelaram que o grupo controle apresentou valores, para todos os diâmetros, estatisticamente superiores aos grupos experimentais, que não diferiram entre si, exceto para 5.0 mm de diâmetro, onde a distância de 0.6 mm apresentou maiores valores (G1- 595,64; G2- 496,46; G3- 441,04; G4- 516,54; G5- 397,85; G6- 442,15; G7- 560,19; G8- 200,88; e G9- 316,04). Os valores médios de

alongamento (mm) para o grupo controle foram estatisticamente superiores aos experimentais nos diâmetros 2.0 e 5.0 mm, não havendo diferença entre os grupos no diâmetro 1,5 mm. Não houve diferença estatística entre os grupos experimentais (G1- 1,68; G2- 1,47; G3- 1,20; G4- 2,61; G5- 1,34; G6- 1,05; G7- 2,51; G8- 0,92; e G9- 1,32). As imagens revelaram eficiente penetração do laser nas amostras de 1.5 e 2.0 mm de diâmetro, e insuficiente nas de 5.0 mm de diâmetro. A resistência à tração para todos os diâmetros e o alongamento para os diâmetros 2.0 e 5.0mm foram influenciados pela técnica de soldagem a laser de forma significativa. Dentre as amostras de 5.0 mm de diâmetro submetidas à soldagem a laser, aquelas com distância de 0.6 mm entre as partes apresentaram maior alcance do feixe de laser.

Hart & Wilson (2006) examinaram, sob simulação de uma carga funcional, a resistência flexural e resistência à fadiga de estruturas em cantiléver de Ti com três métodos de soldagem à laser, usando diferentes quantidade de metal de adição nas juntas a serem soldadas e compararam essas estruturas com as estruturas feitas usando solda TIG. Sessenta estruturas de titânio implanto-suportadas com 12 mm de cantiléver foram fabricado em 4 grupos (n = 15), usando três diferentes protocolos de solda a Laser (com 0, 1 e 2 passos de solda com metal de adição) e um método convencional de soldagem a arco - TIG. O volume do metal de adição utilizado (volumes médios 0, 1.7, 3.4 e 8.3 mm<sup>3</sup>) foi determinada por meio da medição do comprimento do metal, antes e após a soldagem em cada articulação. Dez estruturas de cada grupo foram testados para a resistência à flexão carregando o cantilever à 10 mm a partir do pilar. As cinco estruturas restantes foram igualmente testadas em uma simulação de carga mastigatória de 200 N até a falha, ou a 1 milhão de ciclos. Houve diferenças significativas entre os quatro grupos para resistência à flexão máxima e resistência a cargas cíclicas. O volume de metal de adição foi um preditor significativo da força de flexão final, e foi um determinante do número de ciclos para falha em 200 N. Cada passe de solda a

laser com metal de adição praticamente dobrou a resistência máxima à flexão e resistência à fadiga do procedimento de solda anterior. A soldagem TIG produziu uma blindagem no metal de adição e produziu as articulações mais fortes e resistentes à fadiga. Todas as amostras soldadas à Laser falharam na união de solda nos dois testes enquanto a solda TIG só falhou em deformação plástica nos ensaios de flexão.

Rocha *et al.*, (2006), avaliaram a solda do Ti cp e ligas de Ni-Cr e Co-Cr usando soldagem TIG e laser (Nd:YAG) utilizando o teste de resistência à flexão. Sessenta corpos-de-prova cilíndricos foram confeccionados (20 de cada material), seccionados ao meio e soldados por TIG ou por laser, com e sem metal de adição. Quatro grupos foram formados (n=15). I: soldagem a Laser; II: soldagem à Laser usando metal de adição; III: soldagem com TIG; IV (controle): sem soldagem (corpos-de-prova intactos) As amostras foram submetidas a ensaios de flexão e os resultados analisados pela ANOVA a um critério. Houve diferença estatisticamente significativa entre o metal e as ligas íntegras ( $p < 0.001$ ), sendo a liga do Co-Cr o mais resistente à deflexão. Ao se comparar os diferentes processos de soldagem, diferença estatisticamente significativa ( $p < 0.001$ ) foi encontrada entre a solda TIG e o laser de Nd:YAG e entre este e o laser mais o material de preenchimento. Conclui-se que a soldagem com TIG apresentou melhores resultados que a soldagem com o laser de Nd:YAG para os três materiais testados.

Watanabe & Thopham(2006), investigaram o efeito da proteção de argônio em amostras fundidas em Ti cp e liga de Ti-6Al-7Nb soldadas alaser e compararam os resultados com amostras de Co-Cr e liga de ouro também soldadas com solda laser. As amostras tanto do Ti cp como das outras três ligas foram preparadas a partir da fundição de placas dos respectivos metais nas dimensões de 0.5 x 3.0 x 10mm e o grupo controle, sem solda, nas

dimensões de 0.5 x 3.0 x 20mm. A soldagem foi realizada após o polimento das amostras fundidas. As amostras foram colocadas topo a topo e a soldagem foi realizada por meio de solda laser, com pulso de 10ms, diâmetro do ponto de solda de 1mm e voltagem de 200V. Foram confeccionados 5 corpos de prova para cada grupo e em cada lado da amostra foram disparado 3 ou 5 pontos de solda, com ou sem proteção de gás argônio. As amostras foram testadas em ensaio de resistência à tração com velocidade de 1.0 mm/min e os valores de resistência à tração e alongamento foram registrados. O fator proteção de argônio representou efeito significativo na resistência à tração e no alongamento de amostras soldadas por solda laser. Maiores valores de resistência à tração foram observados nos grupos do Ti cp e da liga de Ti-6Al-7Nb com proteção de argônio e cinco pontos de solda. Estes valores foram tão altos quanto os do grupo controle correspondente a eles. Independentemente da proteção de gás inerte, os valores de resistência à fratura de amostras de liga de ouro foram aproximadamente a metade dos valores obtidos para o grupo controle. Em contraste, os valores de resistência à tração para corpos de prova em Co-Cr foram melhores para as amostras sem proteção de gás inerte. Houve uma correlação positiva entre o alongamento e os valores de resistência à tração. Os autores concluíram que a proteção de gás inerte é necessário para uma efetiva soldagem com solda laser para o Ti cp e para liga de Ti-6Al-7Nb, mas não para as ligas de ouro e Co-Cr.

Lin *et al.*(2007), estudaram a resistência à fratura de placas de Ti cp grau 2 fundidas com comprimento de 30mm e largura de 5mm e diferentes espessuras(1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0)mm. As amostras foram seccionadas no centro de forma a obter duas metades com a mesma medida, posicionadas justapostas e soldadas com solda laser em atmosfera de gás inerte. Cinco diferentes voltagens foram utilizadas (310, 320, 340, 360 e 400) V que correspondem às energias de soldagem de (11, 13, 15, 18 e 24) J. Após o processo de

soldagem, foi feita inspeção radiográfica que verificou que não havia presença de bolhas e porosidades. Para avaliação da resistência à fratura foi utilizado o teste de flexão de quatro pontos em máquina universal de teste mecânico com velocidade de 0,05mm/min. Os resultados mostraram que a diminuição da espessura dos espécimes e / ou aumentando da energia de soldagem, aumentando a porcentagem de área soldada, resultou em um aumento na resistência à fratura. Foi observado que todas as amostras com 3mm de diâmetro fraturaram na região de solda e que as amostras de 1mm foram resistentes à fratura, demonstrando uma significativa deformação plástica. Nas amostras que apresentaram maior porcentagem de área soldada, próxima de 100%, não ocorreram fraturas na área soldada durante o ensaio de resistência à flexão. Assim pode-se concluir que a resistência à fratura de placas fundidas de Ti cp soldadas com solda laser foi significativamente dependente da espessura da amostra e da energia de soldagem.

Srimaneepong *et al.* (2008) investigaram a força de torção, ductilidade e comportamento da fratura de liga de Ti-6Al-7Nb e compararam com amostras fundidas de Ti cp e liga de Co-Cr após a soldagem a laser com dois diferentes parâmetros de soldagem. Quarenta e cinco corpos de prova (n=5) em formato de algarismo foram fundidos nas três ligas metálicas (liga de Ti-6Al-7Nb, Ti cp e liga de Co-Cr). As amostras foram inspecionadas radiograficamente para detecção de bolhas e porosidades internas, e aquelas a serem submetidas ao processo de soldagem a laser foram seccionadas ao meio. A soldagem a laser foi realizada com voltagem de 220V ou 260V, totalizando 9 grupos, 3 para cada metal utilizado. Após a soldagem, todas as amostras foram testadas utilizando um teste de torção. As superfícies da fratura de todos os grupos experimentais, incluindo os grupos soldados a Laser e não soldados, após o teste de torção, foram observados por meio de MEV. Nenhum dos grupos soldados à laser de liga de Ti-6Al-7Nb e Ti cp foi quebrado na junta soldada,

apresentando uma força máxima à torção tão alta quanto ao dos grupos controles. Entretanto, para a tensão de torção os valores para o grupo soldado com 220V de Ti cp apresentaram-se menores em relação aos outros dois, mas não apresentou diferença estatística em relação à eles. Ao contrário dos outros grupos, o grupo soldado a Laser de liga de Co-Cr exibiu fratura frágil das amostras e menores valores de força máxima e tensão de torção. As imagens obtidas em MEV mostraram que os grupos controle e soldados a laser da liga de Ti-6Al-7Nb e do Ti cp apresentaram imagens características de ductilidade enquanto as amostras soldadas de liga de Co-Cr apresentaram imagens mais planas características de fraturas frágeis. Conclui-se que a resistência mecânica da liga fundida de Ti-6Al-7Nb soldada por solda laser é suficiente para aplicações clínicas.

Núñez-Pantoja *et al.* (2011), avaliaram a influência do desenho de juntas soldadas a laser, incluindo o tamanho do *gap* e o diâmetros da secção transversal em estruturas de liga de Ti-6Al-4V, verificando a porcentagem de porosidade presente usando inspeção radiográfica. Sessenta corpos de prova em formato de alteres com diâmetros de 1.5, 2.0 e mm 3.5 no segmento central (n=30), foram usinados a partir de barras de Ti-6Al-4V-grau 5, com base na norma ASTM E8M-04. Os corpos de prova foram seccionados ao meio (20 de cada diâmetro), perpendicularmente ao longo eixo. Estes foram alinhados em uma matriz metálica de modo a manter uma distância de 0.0 e mm 0.6 entre as partes seccionadas, foram então fixados com resina acrílica Duralay e incluídos em gesso tipo IV. Após a presa do gesso a resina foi removida. A soldagem a laser foi realizada com uma energia de 360V e 8ms para as amostras de 1.5 e 2.0mm e 380 V e 9ms para as amostras de 3.5mm, com foco e frequência em zero. Radiografias das amostras após a soldagem foram realizadas para verificar defeitos internos como presença de bolhas e porosidade. A porcentagem de porosidade nas estruturas foi calculada e os dados analisados pelo teste de chi-square com nível de confiabilidade de

95%. Para os corpos de prova de 1,5 mm, para um *gap* de 0.0 mm observou-se uma menor incidência de porosidade interna (0%), sendo significativamente menor do que para o *gap* de 0.6 mm (40%). Para os corpos de prova de 2,0 mm, não houve diferença estatística entre os *gaps* de 0.0 e 0.6. Por outro lado, uma diferença estatística significativa foi encontrada para os *gap* das amostras de 3,5 mm em que a incidência de porosidade foi maior (70%) quando houve contato entre as partes. Os autores concluíram que para corpos de prova com 1.5mm de diâmetro a soldagem laser é eficaz quando as partes a serem soldada são justapostas, entretanto para as amostras de maior diâmetro são sugeridas mudanças na configuração da junta como um desenho em “X”, que segundo os autores diminuiriam a quantidade de bolhas e porosidades internas.

Núñez-Pantoja *et al.*(2011), avaliaram a resistência à fadiga de liga de Ti-6Al-4V soldada a laser de amostras com vários diâmetros e *gaps* e correlacionaram os resultados com a presença de bolhas e porosidades observados nas análises radiográficas. Noventa corpos de prova em formato de alteres com diâmetros de 1.5, 2.0 e mm 3.5 no segmento central (n=30), foram usinados a partir de barras de Ti-6Al-4V-grau 5, com base na norma ASTM E8M-04. Sessenta dos noventa corpos de prova foram seccionados ao meio (20 de cada diâmetro), perpendicularmente ao longoeixo. Estes foram alinhados em uma matriz metálica de modo a manter uma distância de 0.0 e mm 0.6 entre as partes seccionadas, foram então fixados com resina acrílica Duralay e incluídos em gesso tipo IV. Após a presa do gesso a resina foi removida. A soldagem a laser foi realizada com uma energia de 360V e 8ms para as amostras de 1.5 e 2.0mm e 380 V e 9ms para as amostras de 3.5mm, com foco e frequência em zero. Radiografias das amostras após a soldagem foram realizadas para verificar defeitos internos como presença de bolhas e porosidade. A frequência de carregamento no ensaio de fadiga foi de 15 Hz, e as cargas utilizadas foram 463 N, 822 N e 2520 N para 1.5, 2.0 e 3.5



mm de diâmetro, respectivamente. Os espécimes foram então submetidos ao teste de resistência à fadiga e o número de ciclos necessários para causar a fratura por fadiga foi registrado. As superfícies fraturadas foram examinadas em MEV. O número de ciclos obtidos foi analisado utilizando o teste de Kruskal-Wallis e Dunn teste, e os dados das análises radiográficas foram correlacionado com o número de ciclos usando o teste de correlção Spearman. O número de ciclos necessários para a fratura foi menor para todas as amostras com *gap* de 0.6 milímetros e para as amostras de 3.5 mm de diâmetro *gap* de milímetro 0.0. Para as amostras de 1.5 e 2.0 mm de diâmetro com *gap* de 0.0mm comportaram-se de forma semelhante ao grupo controle, sem diferença estatisticamente significante. A correlação de Spearman indicou que houve uma correlação negativa entre o número de ciclos e a presença de porosidade. As imagens de MEV mostraram que a presença de porosidade interna foi maior para o *gap* de 0.6 mm para o diâmetro de 1.5 mm e 2.0 mm. No entanto, a porosidade interna foi menor para este *gap* para o diâmetro de 3.5 mm, quando comparado com o *gap* de 0.0 mm. Assim, os autores concluíram que a soldagem a laser de liga de Ti-6Al-4V com menor diâmetro fornece as melhores condições para a soldagem de estruturas justapostas e que o exame radiográfico permite a detecção de vazios internos nas estruturas de Ti.

#### *2.4. Método dos elementos finitos (MEF)*

O MEF é uma técnica de análise numérica destinada à obtenção de soluções aproximadas de problemas regidos por equações diferenciais. Embora o método tenha sido originalmente desenvolvido para a análise estática de sistemas estruturais, tem sido utilizado no estudo de uma grande variedade de problemas de Engenharia, nos domínios da Mecânica dos Sólidos, Mecânica dos Fluidos, Transmissão de Calor e Eletromagnetismo. Devido à sua eficiência e flexibilidade, além de sua adequação à implementação em computadores digitais,

o MEF tem hoje uma grande difusão tanto no meio acadêmico como no industrial (Rade, 2008).

A principal motivação para o uso do MEF reside no fato que, devido à complexidade dos problemas práticos de Engenharia, soluções analíticas em forma fechada tornam-se inviáveis ou mesmo impossíveis. Uma segunda alternativa consiste em preservar a complexidade do modelo e empregar técnicas aproximadas de resolução. Esta segunda estratégia, na qual está inserido o MEF, tem sido cada vez mais viabilizada pela crescente capacidade de processamento dos computadores digitais (Rade, 2008).

O MEF é essencialmente um processo de discretização, que visa transformar um problema infinito-dimensional em um problema finito-dimensional, com número finito de incógnitas. O método consiste em dividir o domínio sobre o qual o problema é estudado em várias regiões interconectadas, denominadas elementos. Cada elemento dispõe de um certo número de pontos (interiores e/ou limítrofes), denominados nós ou pontos nodais. O conjunto de elementos utilizados na discretização é denominado malha (Rade, 2008).

Em linhas gerais, pode-se definir o MEF como um método matemático, no qual um meio contínuo é discretizado (subdividido) em elementos que mantêm as propriedades de quem os originou. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos para que sejam obtidos os resultados desejados.

Atualmente, abordagens experimentais numéricas, sem dúvida, representam uma investigação *in vitro* muito abrangente na odontologia. Eles permitem ao pesquisador reduzir o tempo e o custo necessário para trazer uma nova idéia de conceito de aplicação clínica e/ou aumentar sua confiança na concepção final do projeto.

Existem muitos trabalhos que utilizam modelos numéricos a fim de verificar alguns problemas tais como deformações, tensões e até microestruturas resultantes do processo de

soldagem. Entretanto este tipo de análise não é uma tarefa muito fácil, porque envolve uma interação entre análises térmicas, mecânicas e metalúrgicas (Araújo DB, 2008).

### **3. PROPOSIÇÃO**

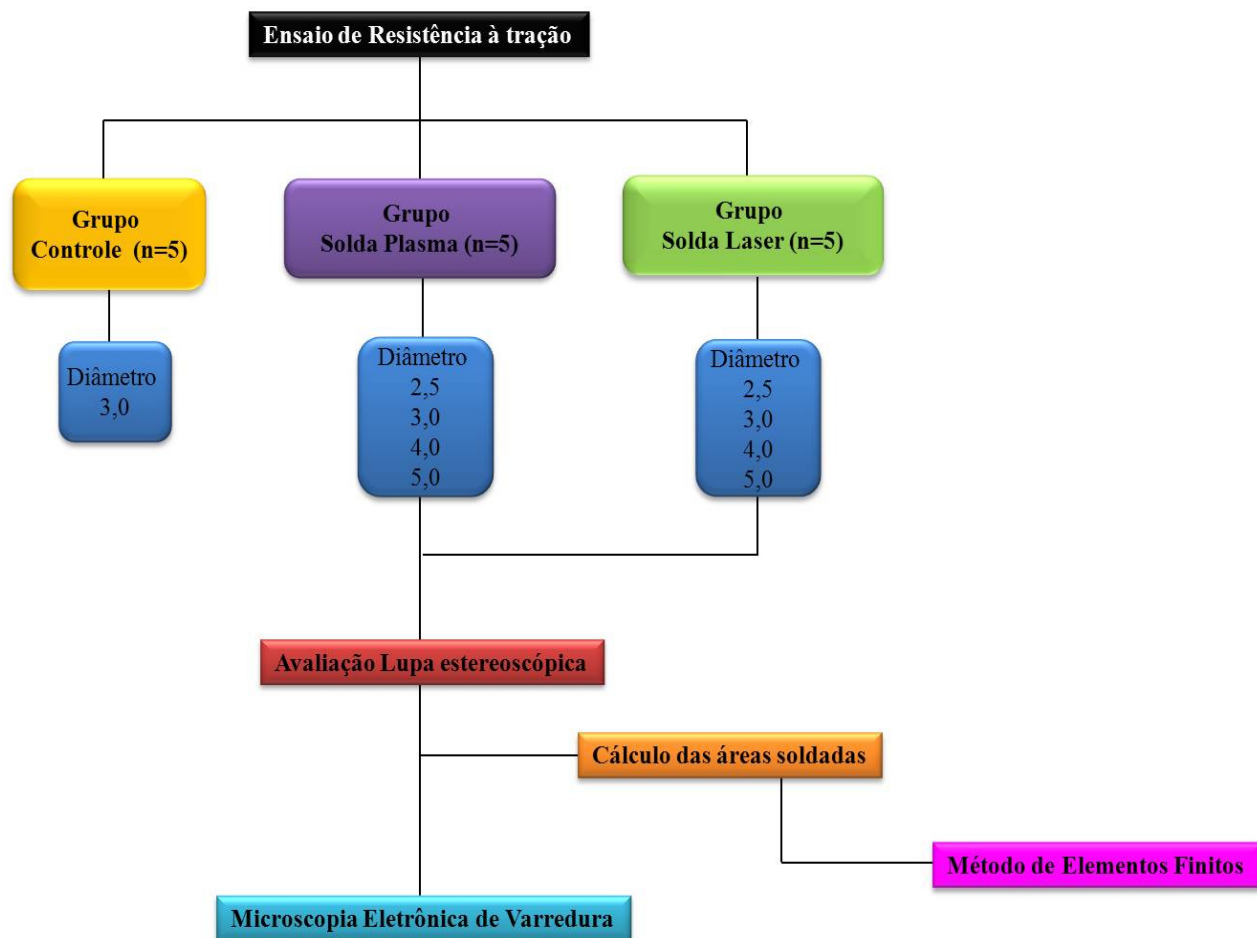
1. Avaliar o comportamento mecânico de estruturas pré-fabricadas de liga Ti-6Al-4V frente a dois tipos de processo de soldagem, solda laser e solda plasma, variando o diâmetro da amostra (2.5mm/3.0mm/4.0mm/5.0mm), utilizando ensaio de tração e modelagem por Elementos Finitos;
2. Quantificar e correlacionar a área de penetração das soldas em Lupa estereoscópica após a ruptura das amostras com resistência a tração para os diferentes diâmetros e tipos de solda;
3. Avaliar e qualificar o aspecto da superfície da fratura por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

### **4. MATERIAL E MÉTODOS**

#### *4.1 Delineamento Experimental*

Quarenta e cinco corpos de prova de liga de Ti-6Al-4V 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 corrente de 10 A e pulso de 3 ms e o Laser com voltagem de 365 V e pulso de 9ms com foco e frequência calibrados em zero. As amostras foram submetidas ao ensaio de tração em máquina servohidráulica com velocidade de 0,2mm/min até a ruptura e os valores de porcentagem de

alongamento foram obtidos. 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 de bancada nos aumentos de 500 e 1200x. Modelos aproximados de EF foram desenvolvidos em ambiente Workbench com condições de contorno simulando um ensaio de tração, conforme o organograma abaixo.



## 4.2. Ensaio de Resistência à Tração

### 4.2.1. Grupos estudados

Foram confeccionados 45 corpos de prova em formato de halteres de liga de Ti-6Al-4V, divididos em nove grupos (n=5), de acordo com a tabela 1: Grupo Controle com diâmetro de 3 mm, constituídos por corpos de prova intactos; Grupos PL2.5, PL3, PL4 e PL5 com

diâmetros de 2.5, 3, 4 e 5 mm respectivamente e submetidos ao processo de soldagem plasma e Grupos L2.5, L3, L4 e L5 com diâmetros de 2.5, 3, 4 e 5 mm, respectivamente, e submetidos ao processo de soldagem laser.

**Tabela 1:** Distribuição dos grupos estudados

Grupo	Número de Amostras	Diâmetro	Pulso (ms)	Corrente/Voltagem (A ou V)
<b>Controle</b>	5	3	-	-
<b>PL2.5</b>	5	2.5	3	10 A
<b>PL3</b>	5	3	3	10 A
<b>PL4</b>	5	4	3	10 A
<b>PL5</b>	5	5	3	10 A
<b>L2.5</b>	5	2.5	9	365 V
<b>L3</b>	5	3	9	365 V
<b>L4</b>	5	4	9	365 V
<b>L5</b>	5	5	9	365 V

#### 4.2.2. Confeção e preparo dos corpos de prova

Os corpos de prova foram obtidos a partir da usinagem de barras pré-fabricadas de liga de Ti-6Al-4V de 10 mm de diâmetro (Realum, Indústria e Comércio de Metais Puros e Ligas LTDA, São Paulo, SP, Brasil), cujas informações, fornecidas pelo fabricante, estão no Quadro 1, em formato de halteres com diferentes diâmetros (2.5, 3, 4 e 5 mm), sendo suas dimensões obtidas a partir da norma ASTM E 8, como demonstrado na figura 1. As amostras foram usinadas em torno mecânico (PRN 320 IMOR, Indústria Romi S.A., Santa Bárbara D'Oeste, SP, Brasil), lotado no Laboratório de Projetos Mecânicos Prof. Henner Alberto Gomide da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (LPM/FEMEC/UFU) (Figura 2a). Os grupos experimentais foram usinados em suas metades para posteriormente serem soldados (Figura 2b) e as amostras do grupo controle foram usinadas intactas.

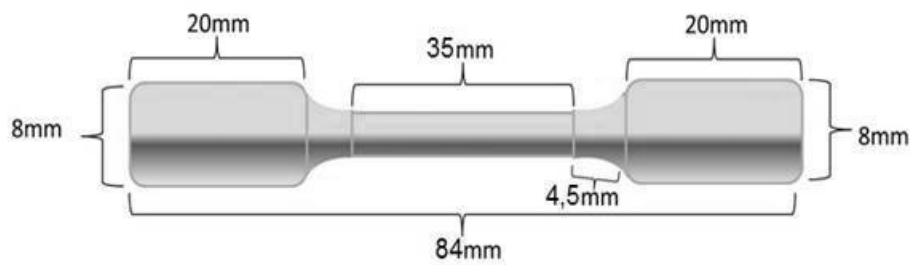


Figura1: Dimensões do corpo de prova (ASTM E8).

**Quadro 1:** Composição da liga TI-6AL-4V.

TI-6AL-4V		
	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.

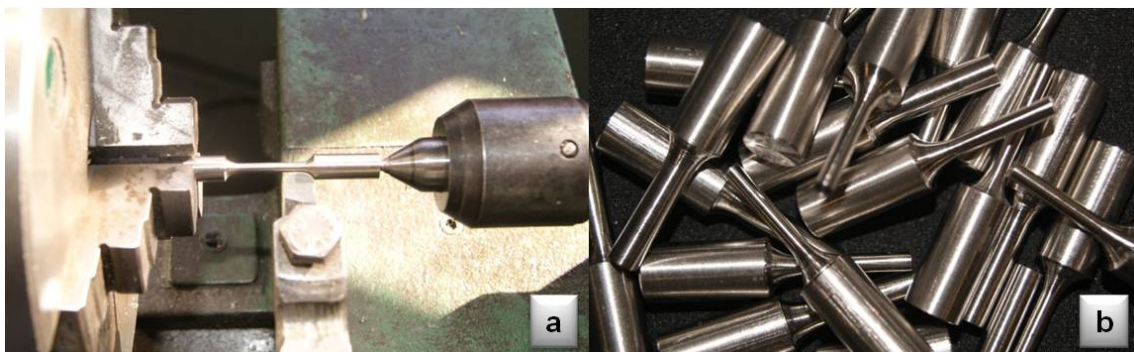


Figura 2: a) Usinagem dos corpos de prova; b) Metades dos corpos de prova.

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

Estes foram colocados em aparelho de ultrassom (Thornton T14, Vinhedo, São Paulo, Brasil) (Figura 3), lotado no Laboratório de Prótese Fixa da Escola Técnica de Saúde da Universidade Federal de Uberlândia (ESTES/UFU) com álcool 99,5° GL (EMFAL LTDA, Betim, MG, Brasil) por 10 minutos para realizar a limpeza da superfície. Ao final, foram secos com papel absorvente para que o processo de soldagem pudesse ser realizado.

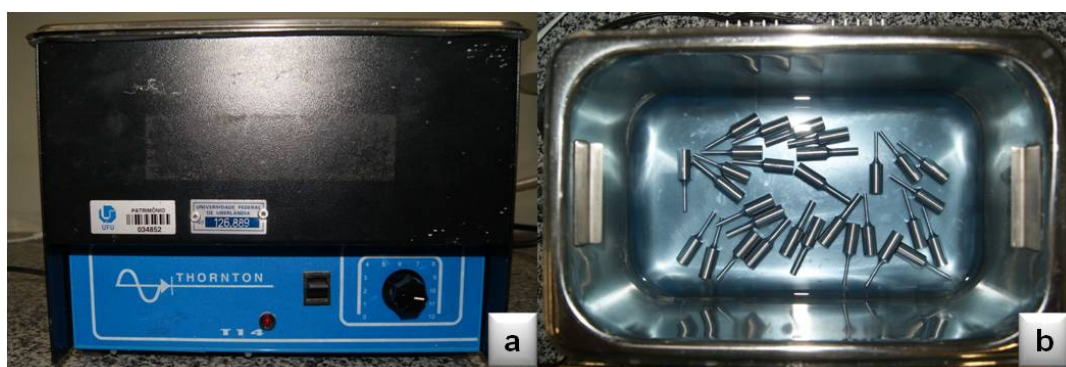


Figura 3: a) Aparelho de ultrassom; b) amostras imersas pelo álcool 99,5° dentro da cuba do aparelho.

#### *4.2.3. Processos de Soldagem*

As metades dos corpos de prova dos grupos experimentais foram unidas por meio de um dispositivo metálico confeccionado especialmente para esse trabalho, que permite a padronização da posição de soldagem (Figura 4a). As amostras foram colocadas topo-a-topo com uma distância de 0.0mm de distância entre as metades.

#### Soldagem plasma

A máquina de solda plasma (Micromelt EDG, São Carlos, SP, Brasil) lotada no Laboratório de Prótese Fixa da Escola Técnica de Saúde da Universidade Federal de Uberlândia (ESTES/UFU) (Figura 4b) foi regulada para trabalhar com pulso de 3ms e profundidade de 10 A. Para tanto, o aparelho foi montado com um eletrodo de tungstênio (EDG, São Carlos, SP, Brasil) devidamente afiado em formato de ponta de lápis 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. 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, as estruturas foram removidas da matriz para possibilitar a soldagem de toda a circunferência (Figura 4c). A soldagem plasma consiste basicamente em um processo no qual a união é obtida pelo aquecimento do metal por um arco estabelecido entre o eletrodo não consumível de tungstênio e a peça, com o conjunto protegido por uma atmosfera de gás inerte (Marques et al.,



2007).

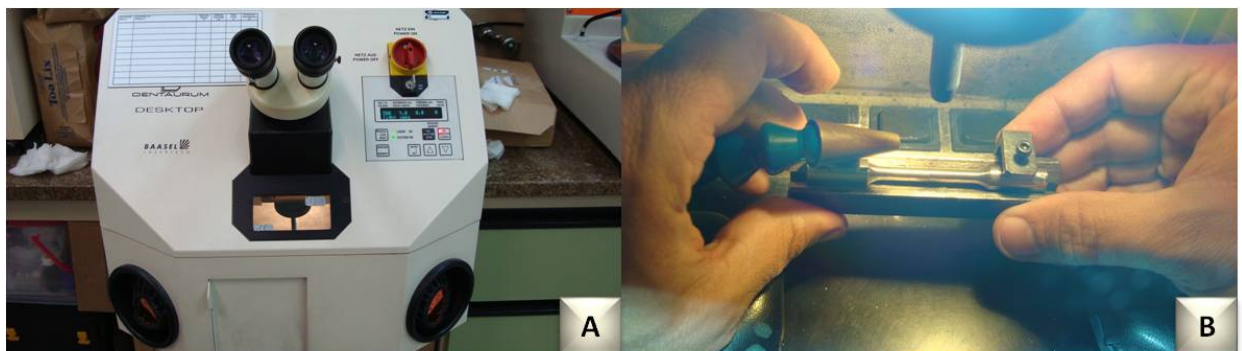
Figura 4: a) Aparelho de solda Plasma Micromelt; b) Matriz para a padronização da posição de soldagem; c) Aspecto final das amostras após a soldagem.

### Soldagem laser

Neste trabalho, a soldagem laser foi realizada em uma soldadora a Laser (Desktop – Dentaurem JP Winkelstroter KG, Pforzheim, Alemanha), que utiliza um cristal de ND:YAG como fonte de luz, programada para trabalhar com 365V/9ms (para todos os diâmetros) com foco e frequência em zero, lotada no Laboratório de Prótese Removível da Faculdade de Odontologia de Piracicaba da Universidade Estadual de Campinas (FOP/UNICAMP) (Figura 5 a). As amostras foram posicionadas no interior da câmara de soldagem, sendo disparados



dois pontos iniciais de solda em regiões diametralmente opostas sob atmosfera protetora de argônio. Após a fixação inicial, o dispositivo foi removido para facilitar o restante da soldagem. (Figura 5b). A soldagem a laser consiste basicamente na fusão localizada da junta a ser soldada, por meio do bombardeamento por um feixe de luz concentrada, coerente, monocromática de alta intensidade. Quando o feixe atinge a superfície do metal este absorve a energia deste e convertida em calor que penetra no interior do metal por condução. Devido a alta concentração de calor o metal é levado ao seu ponto de fusão e acima dele e uma série de eventos culmina com a formação de um keyhole ou concavidade se será preenchida com o



metal derretido (Marques *et al.*, 2007).

Figura 5: a) Aparelho de solda Laser e b) Amostra posicionada na câmara do aparelho.

#### 4.2.4. Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado em máquina servohidráulica MTS® 810 (Material Test System Corporation, Minneapolis, Minesota, USA), lotada no Laboratório de Projetos Mecânicos Prof. Henner Alberto Gomide da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (LPM/FEMEC/UFU) e célula de carga de 2.500 Kgf, com velocidade de 0,2mm/min (Figura 6a e b). O ensaio foi considerado finalizado com a ruptura dos corpos de prova, sendo registrados nesse momento os valores de tensão máxima (MPa) (Figura 7a) e o próprio programa forneceu o gráfico de força-deslocamento (Figura 7b).

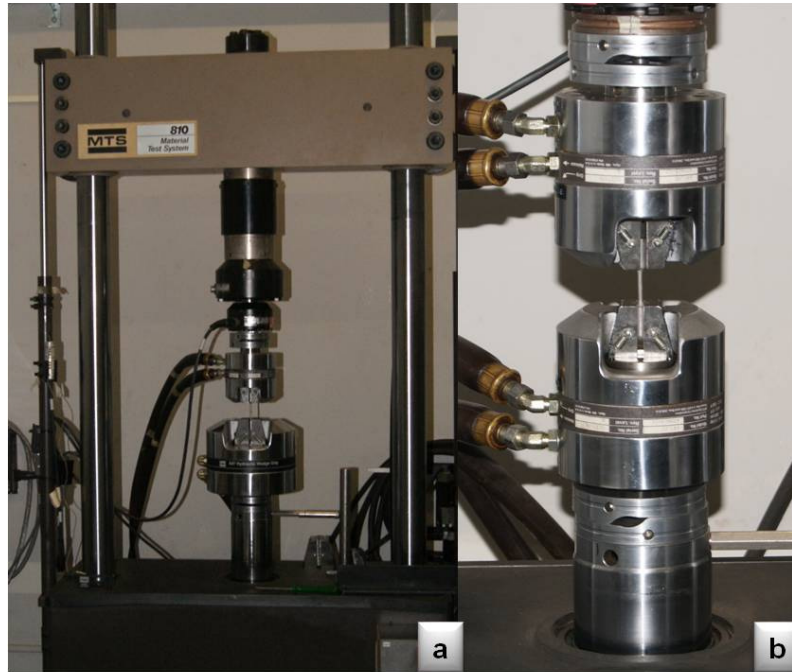


Figura 6: a) Máquina de ensaios mecânicos MTS® 810 e b) Detalhe da garra da máquina com corpo de prova posicionado.

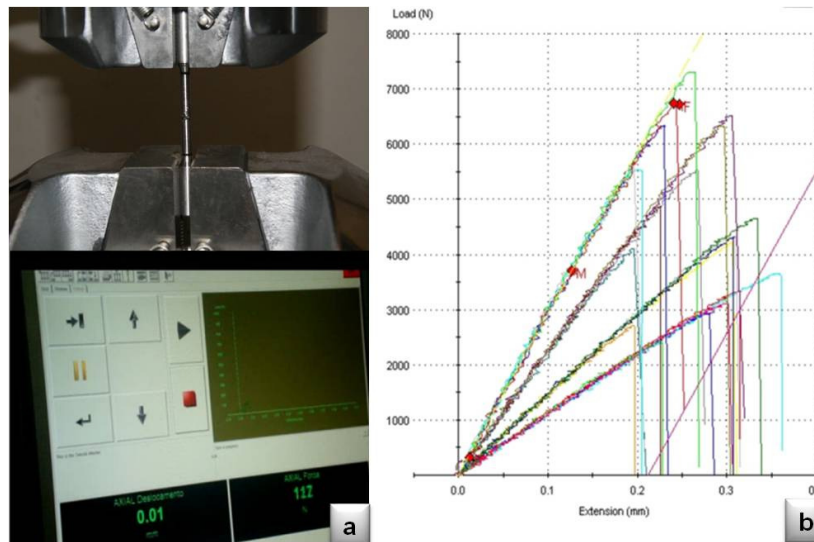


Figura 7: a) Computador acoplado à célula de carga; b) Curvas força x deslocamento.

#### 4.2.5. Percentual de alongamento

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

$$A = \frac{Lf - Lo}{Lo}$$

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

#### 4.2.6. Avaliação em Lupa estereoscópica

Após o ensaio de tração, as amostras foram submetidas à avaliação da penetração da solda na região da fratura, por meio de Lupa estereoscópica (Leica MS5, Leica Microscopy Systems Ltd. Heerbrugg - Switzerland) (Figura 8a), lotada no Laboratório Integrado de Pesquisa Odontológica da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia (LIPO/FOUFU), com iluminação externa, sob aumento de 2.5x para os diâmetros 2.5 e 3 mm e aumento de 1.6x para os diâmetros 4 e 5 mm. Como 39 das 40 amostras sofreram ruptura na região da solda, todas as imagens capturadas foram analisadas no software Motic Images Plus 2.0ML for Windows (Motic instruments, INC, Richmond, Canadá) onde foram feitas as delimitações das áreas soldadas (Figura 8b) e o cálculo dessas áreas, que posteriormente foram convertidas em porcentagem de área soldada para efeito de comparação entre os diferentes diâmetros.

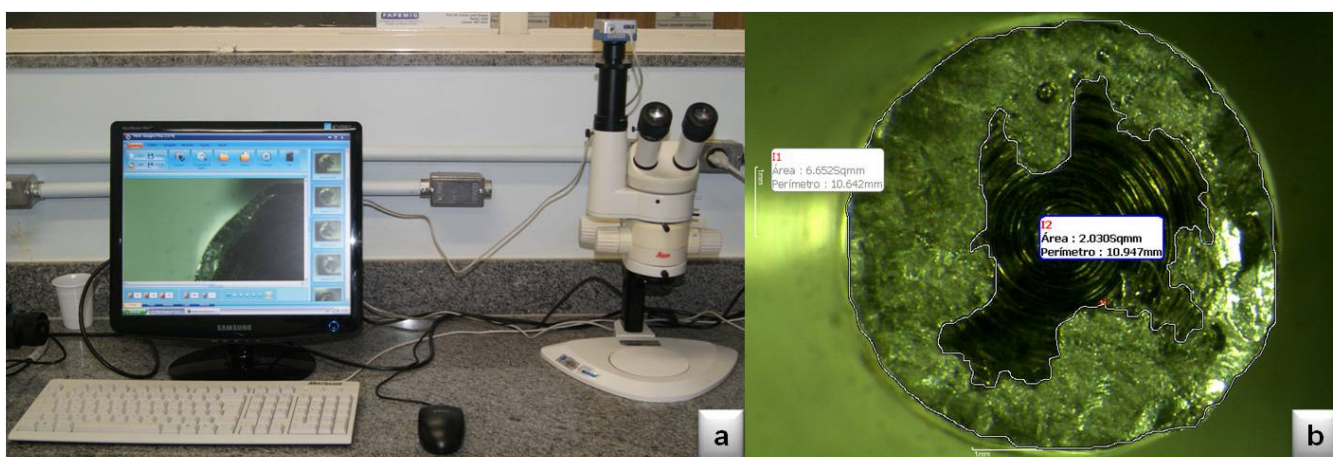


Figura 8: a) Lupa Estereoscópica; b) Exemplo de imagem gerada pela lupa estereoscópica e de como foram realizadas as medidas da área de penetração no software.

#### 4.2.7. Análise da fratura (MEV)

Após avaliação em Lupa estereoscópica, os segmentos de cada amostra foram seccionados próximos à área de solda, por meio de disco de *carborundum* acoplada à peça reta em motor elétrico (Figura 9 a e b). Os segmentos foram colados em *stubs* (Figura 9 c) com etil-cianocrilato (Super Bonder®, Henkel Ltda, Diadema, São Paulo, Brasil) para que pudessem ser levados ao MEV.

Estes foram colocados em aparelho de ultrassom (Thornton T14, Vinhedo, São Paulo, Brasil) por 10 minutos para realizar a limpeza da superfície. Ao final, foram completamente secos com ar comprimido livre de óleo para serem analisados em MEV de bancada (Hitachi – TM 3000, Germany), lotado no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (LEPU/FEMEC/UFU) (Figura 10). Foram feitas imagens nos aumentos de 500 e 1000X e as imagens mais representativas dentro dos grupos experimentais foram selecionadas.

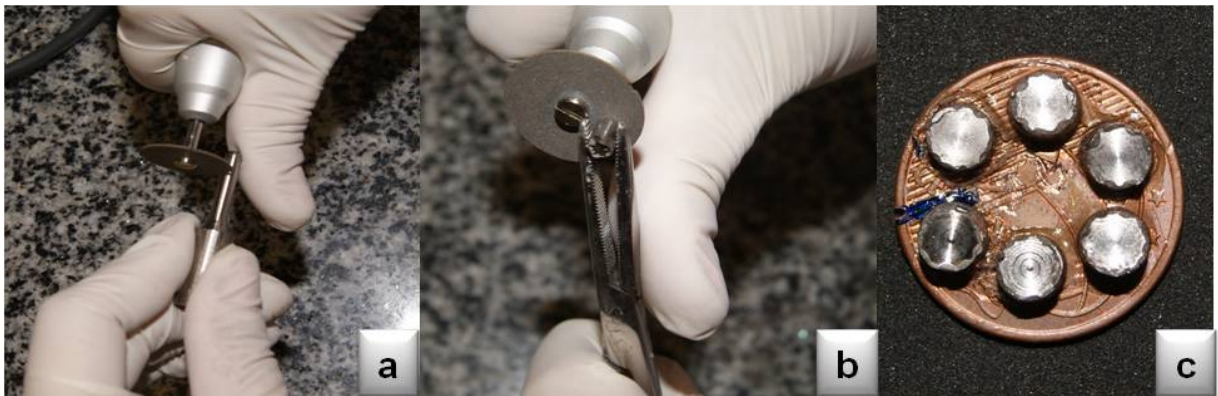


Figura 9: a e b) Amostras sendo seccionados próximos a área soldada com disco de carborundum e alisadas na face contrária à soldada para serem coladas nos *stubs*; c) corpos de prova colados em *stubs* para serem submetidos ao MEV.





Figura 10: Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de bancada indicado na seta.

#### *4.2.8. Análise estatística*

Uma vez que os dados de tensão máxima, porcentagem de área de solda e porcentagem de alongamento apresentaram distribuição normal (Shapiro-Wilk,  $p > 0,05$ ) e de homogeneidade de variância (Teste de Levene,  $p > 0,05$ ) foram usados testes estatísticos paramétricos. Os dados de tensão máxima e porcentagem de área de solda foram submetidos ao teste Anova Two-way para avaliar a influência do tipo de solda (Laser e Plasma) e diâmetro (2.5; 3.0; 4.0; 5.0) bem como a interação dos dois fatores. O teste de Dunnett foi usado para comparação dos grupos testados com o grupo controle, teste de Tukey para verificar diferenças entre os grupos testados e o teste T-student para comparar os tipos de solda para cada parâmetro analisado. O teste de correlação de Pearson averiguou a correlação entre os valores de tensão máxima e porcentagem de área soldada e o teste de correlação de Spearman's avaliou a correlação entre o diâmetro e os valores de tensão máxima e porcentagem de área soldada. Todos os testes foram realizados no programa SigmaStat 3.5 com um nível de probabilidade de 95% ( $\alpha=0,05$ ).

#### 4.3. Análise pelo Método de Elementos Finitos

A seguir são detalhadas todas as etapas realizadas na construção do modelo empregado neste trabalho. Somente os corpos de prova de 3mm de diâmetro foram utilizados para análise numérica.

##### 4.3.1. Definição da geometria do modelo de EF

O corpo de prova em liga Ti-6Al-4V com dimensões descritas na figura 1 foi utilizado como referência para a obtenção do modelo geométrico sem solda e soldadas a plasma e laser. A geometria dos corpos de prova intactos foram confeccionados o mais próximo da geometria real (Figura 11a) e as geometrias dos corpos de prova soldados foram confeccionados em três partes, sendo a parte central com menor diâmetro obtida pelos valores das áreas soldadas (Figura 11b). Estes modelos foram desenvolvidos no programa Solidworks versão 2010, O tipo de análise numérica utilizada foi linear elástica tridimensional, onde todos os materiais empregados na análise foram considerados elásticos lineares.

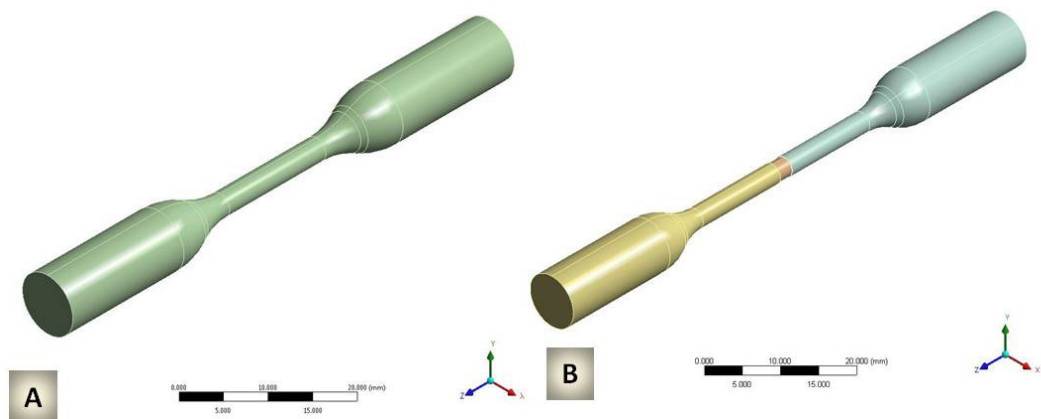


Figura 11: a) Corpo de prova intacto (grupo controle) e b) Corpo de prova soldado

##### 4.3.2. Confeção da Malha do modelo

Em seguida, a “malha” do modelo foi processada obtida utilizando processo de confecção de malha automática livre disponível no ANSYS 12 (Ansys Inc, USA) (Figura 12),

A malha gerada foi refinada em todo corpo de prova como demonstrado na figura 12. O número de nós e elementos de cada modelo estão descritos no quadro 2.

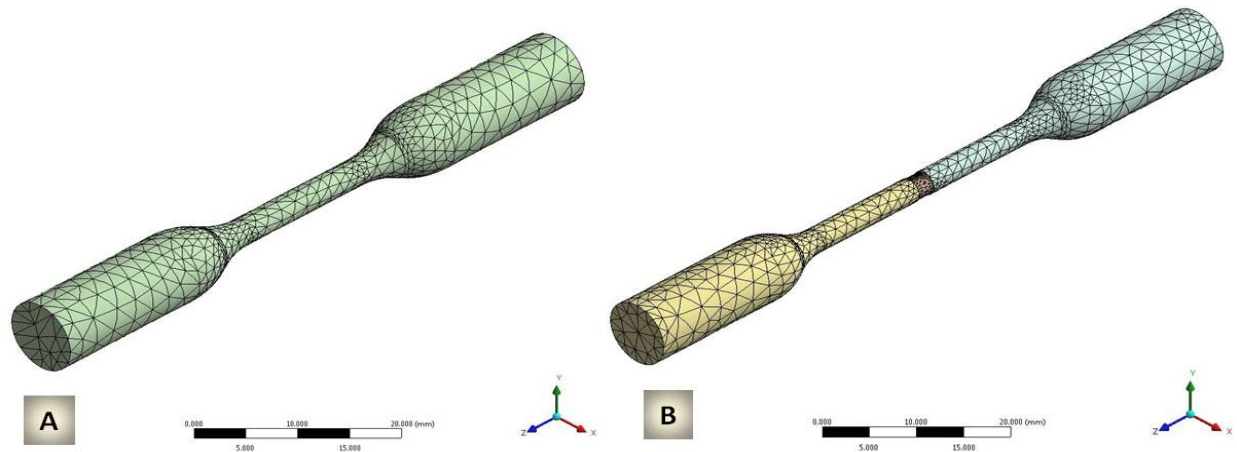


Figura 12: a e b) Malha gerada dos corpos de prova intactos e soldados, respectivamente.

**Quadro 2** – Número de nós e elementos de cada modelo

	Sem Solda	Solda Plasma	Solda Laser
<b>Nós</b>	4699	7907	6993
<b>Elementos</b>	2202	3740	3270

#### 4.3.3. Definição das propriedades mecânicas

O material foi considerado homogêneo e isotrópico. Desta forma esta simplificação faz com que o modelo necessite de apenas duas propriedades mecânicas para caracterização do seu comportamento mecânico: o **Módulo de elasticidade (E)** e o **Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )**.

O módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson das estruturas correspondente ao metal base foram fornecidos pelo próprio software, o valor do módulo de elasticidade foi aumentado em torno de 20% para a área de solda. Estes valores estão no quadro 3. O módulo de elasticidade da área soldada foi aumentado em 20%, visto que na literatura há relato de que

há um aumento da dureza nesta região, portanto foi feito uma estimativa de quanto seria maior esta dureza e chegou-se a este valor de 20%.

**Quadro 3.** Propriedades mecânicas da liga Ti-6Al-4V

	Módulo de elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson
Liga de <b>(Ti 6Al-4V)</b>	96	0.35
ZAC	115	0.35

#### 4.3.4. Condições de contorno e carregamento

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 (Figura 13). Os valores de força utilizados foram obtidos do ensaio de tração e estão apresentados no quadro 4.

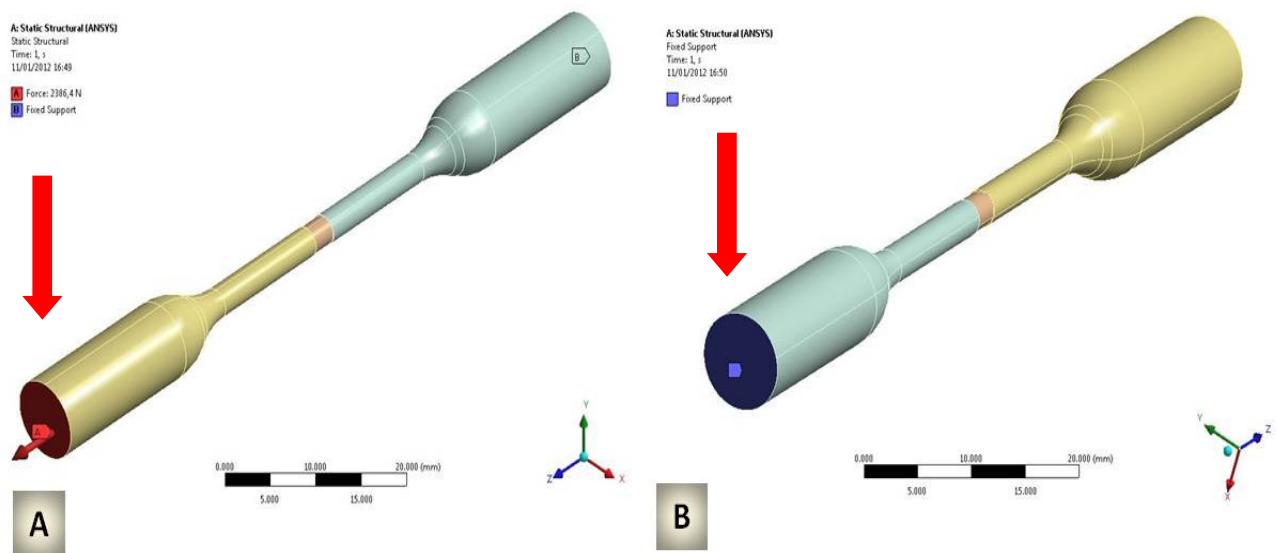


Figura 13: Condições de contorno; a) Aplicação da força no eixo Z; b) Engastamento no lado contrário à aplicação na força também no eixo Z.



**Quadro 4.** Média das forças utilizadas na análise numérica

Força (N)		
Sem solda	Solda Plasma	Solda Laser
1101	198	248
2178	452	529
4297	932	1042
6114	1423	1520
6608	1911	2005
6810	2389	2499

#### *4.3.5. Análise das tensões no MEF*

Após a etapa de processamento foram obtidos os dados dos campos do deslocamento no eixo Z (mm) e tensão principal máxima (MPa).

#### *3.3.6 Análise estatística*

Os dados encontrados na avaliação de elementos finitos foram analisados de forma comparativa direta entre os modelos gerados para os diferentes processos de soldagem em relação ao modelo gerado para o corpo de prova intacto e entre os modelos numéricos e experimentais. Neste momento, para análise pelo MEF, o termo experimental será usado para designar os corpos de prova que foram submetidos ao ensaio experimental de tração, independentemente se este recebeu tratamento ou não com solda.

#### *4.3.7. Validação do modelo de EF*

Os valores da força aplicados no ensaio de 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, como pode ser visto na figura 14.

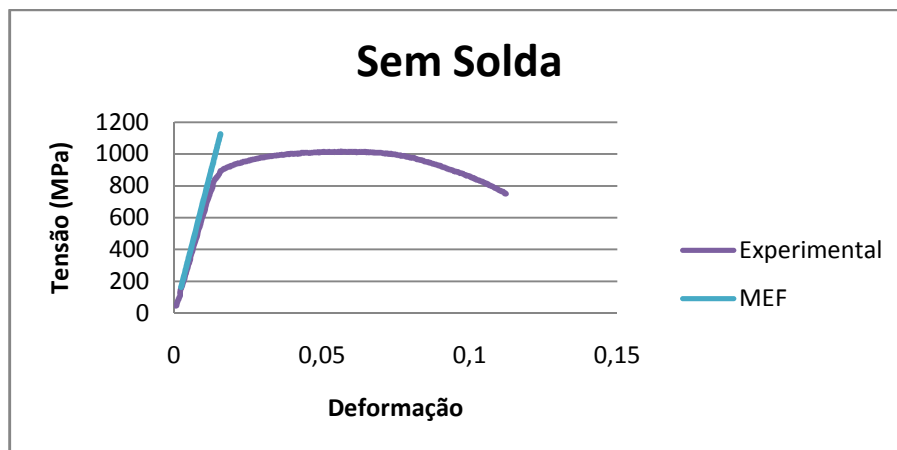


Figura 14 – Curva tensão x deformação para os grupos experimentais para o MEF.

A validação de modelo de EF busca ajustar as condições de contorno do modelo numérico ao modelo experimental como: as condições de engastamento, aplicação da força (Figura 14) e valores das propriedades mecânicas.

## 5. RESULTADOS

Os resultados serão apresentados em quatro divisões: Solda Plasma, Solda Laser, relação entre Solda Plasma e Solda Laser e Método de Elementos Finitos.

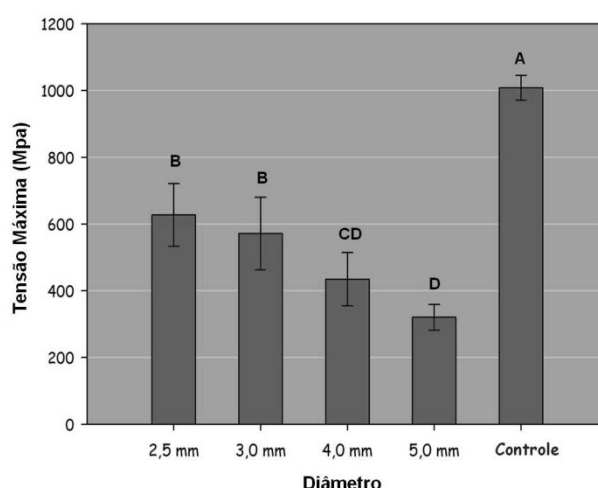
### 5.1. Solda Plasma

#### 5.1.1. Ensaio de tração, lupa estereoscópica e MEV

As médias e desvio padrão das tensões máximas estão descritos na tabela 2. O grupo controle ( $1008,46 \pm 37,1$ ) apresentou maiores valores de tensão máxima do que os grupos experimentais. Dentro dos grupos experimentais o grupo PL2.5 ( $627,32 \pm 94,18$ ) e PL3 ( $571,54 \pm 108,64$ ) apresentaram os maiores valores de tensão máxima e o grupo PL5 ( $320,6 \pm 38,68$ ) apresentou os menores valores.

**Tabela 2.** Valores de tensão máxima (MPa) para solda Plasma

Grupo	Controle	PL2.5	PL3	PL4	PL5
01	1000,32	601,08	596,76	326,75	285,31
02	1072,93	486,02	611,98	387,71	322,77
03	990,78	737,63	381,65	518,32	372,22
04	978,56	678,55	609,49	501,74	280,55
05	999,72	633,33	657,80	439,60	342,16
Média	1008,46 <sup>A</sup>	627,32 <sup>B</sup>	571,54 <sup>BC</sup>	434,82 <sup>CD</sup>	320,6 <sup>D</sup>
Desvio Padrão	37,1	94,18	108,64	79,64	38,68

**Gráfico 1** -Tensão máxima para solda Plasma

As médias e desvio padrão para os alongamento medidos estão presentes na tabela 3. As médias para o alongamento de todos os grupos testes variam entre 0,38% (grupo PL4) a 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.

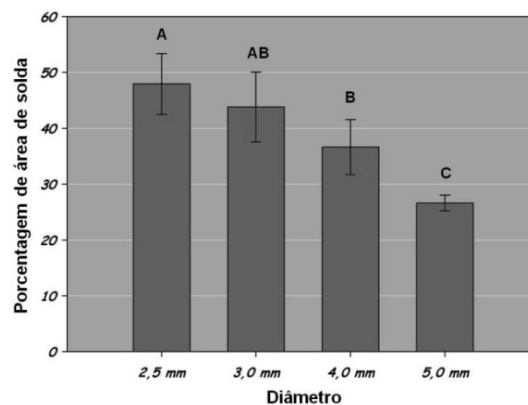
**Tabela 3.** Alongamento (%) para Solda Plasma

Grupo	Controle	PL2.5	PL3	PL4	PL5
01	6,00	2,26	2,43	0,17	2,28
02	8,86	0,26	0,26	0,11	2,71
03	7,71	2,66	2,37	0,37	0,68
04	6,57	2,03	1,11	0,31	0,63
05	8,28	0,80	1,03	0,91	1,80
Média	7,48 <sup>A</sup>	1,60 <sup>B</sup>	1,44 <sup>B</sup>	0,38 <sup>B</sup>	1,62 <sup>B</sup>
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 tabela 4. 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 ( $47,93 \pm 1,89$ ) e PL3 ( $43,80 \pm 2,46$ ) apresentaram os maiores valores de porcentagem de área soldada e o grupo PL5 ( $26,60 \pm 1,89$ ) os menores.

**Tabela 4.** Porcentagem de área de solda(%) para Solda Plasma

Grupo	PL2.5	PL3	PL4	PL5
1 <sup>a</sup>	47,45	47,50	30,39	28,42
1b	46,55	45,00	31,78	26,05
2 <sup>a</sup>	39,86	44,96	32,16	24,55
2b	38,44	42,38	31,85	26,33
3a	51,48	34,84	42,66	29,63
3b	54,17	31,28	41,96	27,94
4a	53,01	46,26	40,57	24,10
4b	50,75	49,03	39,31	27,82
5a	47,47	45,83	36,96	25,47
5b	50,08	50,98	38,96	25,74
Média	47,93 <sup>A</sup>	43,80 <sup>AB</sup>	36,66 <sup>B</sup>	26,60 <sup>C</sup>
Desvio Padrão	1,86	2,46	6,06	1,89



**Gráfico2** -Porcentagem de área de solda para solda Plasma

As figuras abaixo (Figuras 15 à 18) são referentes às imagens obtidas na Lupa estereoscópica para os corpos de prova soldados com solda Plasma após o ensaio de resistência à tração. As imagens demonstram que a solda não penetra por todo o diâmetro do

corpo de prova, deixando o centro da amostra sem solda e este achado foi consistente para todas as amostras.

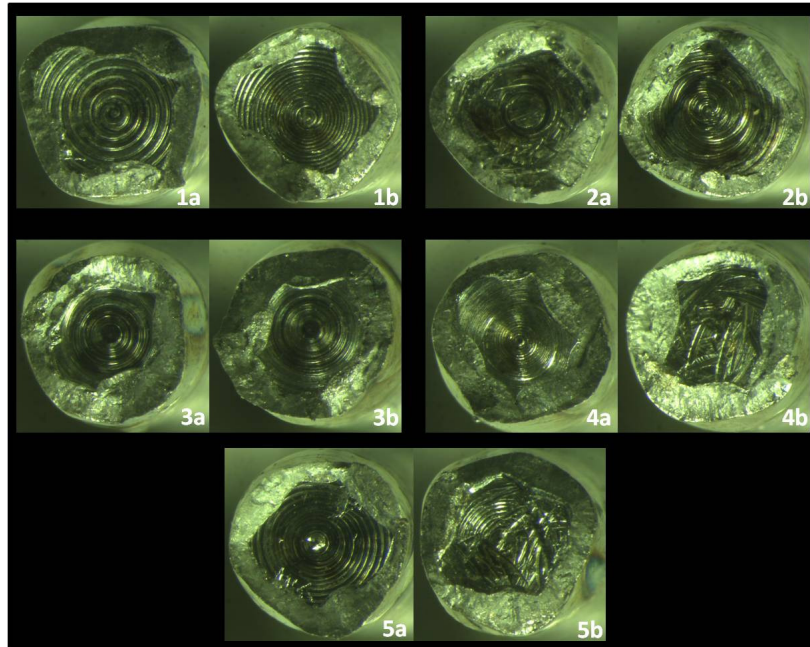


Figura 15– Imagens obtidas por meio de lupa estereoscópica para os corpos de prova do grupo PL2.5.

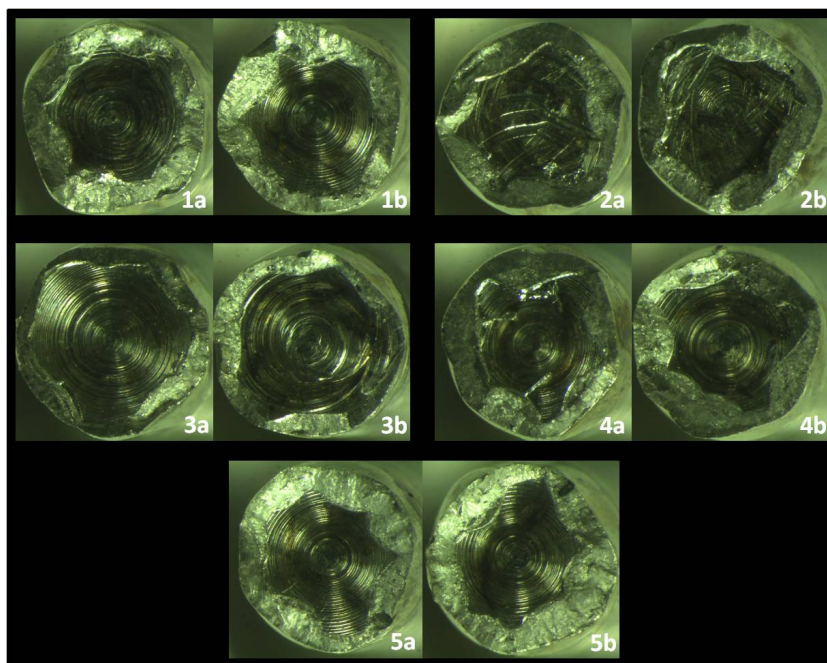


Figura 16– Imagens obtidas por meio de lupa estereoscópica para os corpos de prova do grupo PL3.

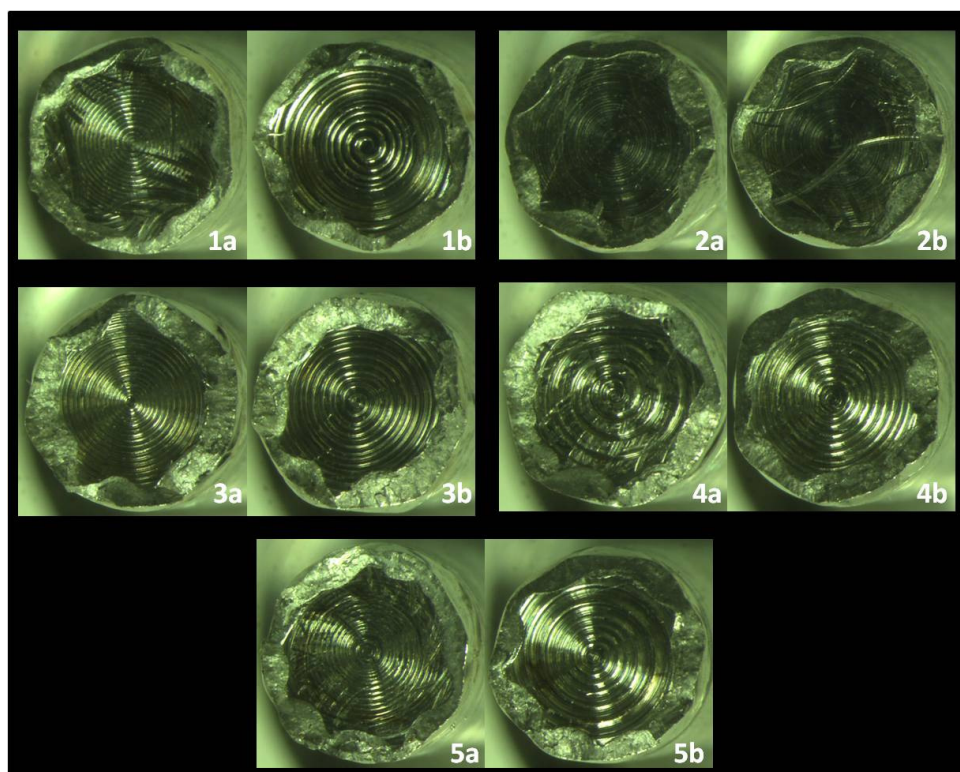


Figura 17– Imagens obtidas por meio de lupa estereoscópica para os corpos de prova do grupo PL4.

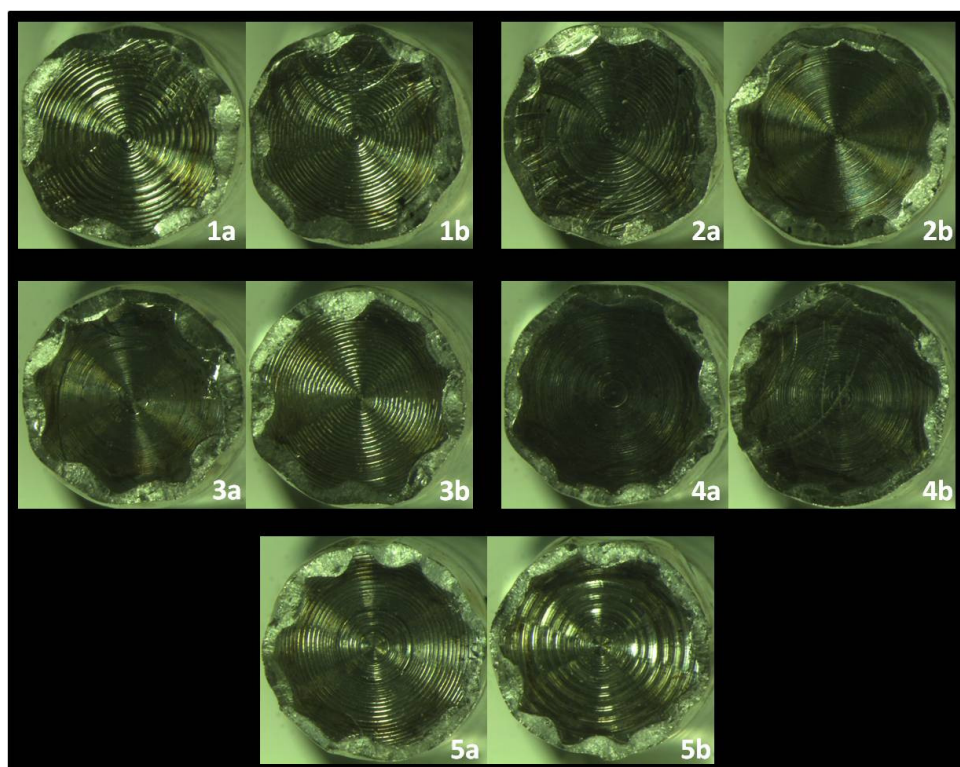


Figura 18– Imagens obtidas por meio de lupa estereoscópica para os corpos de prova do grupo PL5.



As Figuras 19 (a e c) são imagens deMEV (ampliação de 500x) da área de fratura da solda e as Figuras 18 (b e d) são imagens deMEV (aumento de 1200x). Elas revelam que a fratura na liga de TI-6AL-4V tem uma superfície em geral plana, indicada pelos círculos azuis, 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) indicadas pelo círculos vermelhos, 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.

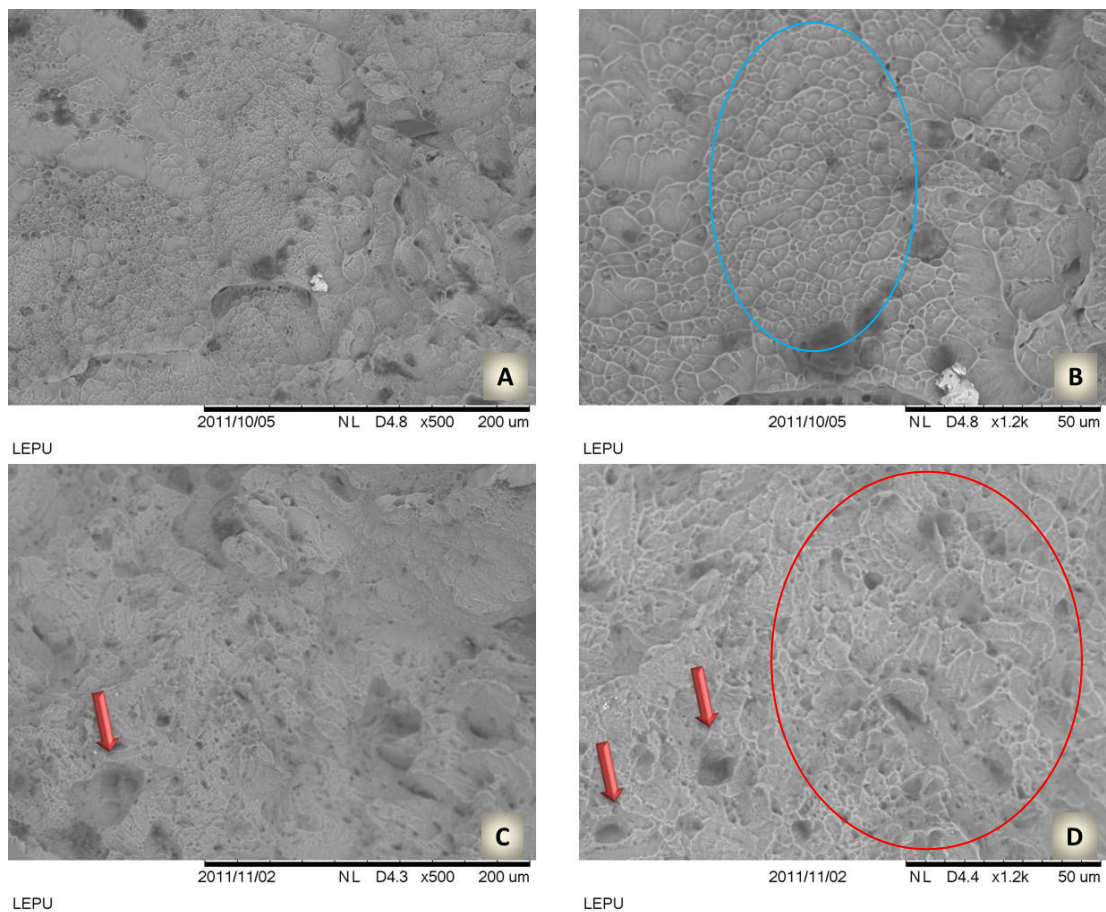


Figura 19: a e b): Amostra de imagens de MEV nos aumentos de 500x e 1200x de corpos de prova do grupo PL3, respectivamente; c e d): Exemplos de imagens de MEV nos aumentos de 500x e 1200x de corpos de prova do grupo PL5, respectivamente.

Foi possível observar a partir do teste de correlação de Pearson que houve forte correlação positiva. Quanto maior foi a tensão máxima maior foi a porcentagem de área soldada (0.981). Foi possível observar a partir do teste de correlação Spearman's que houve correlação negativa. Quanto menor foi o diâmetro do corpo de prova maior foi a porcentagem de área soldada (-0.869) e maior foi a tensão máxima (-0.830).

## 5.2. Solda Laser

### 5.2.1. Ensaio de tração, lupa estereoscópica e MEV.

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

**Tabela 5.** Valores de tensão máxima (MPa) para Solda Laser.

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

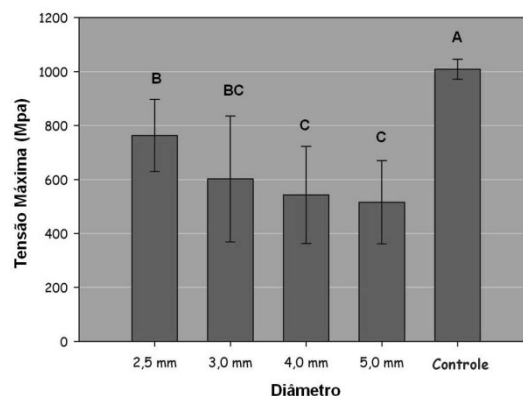


Gráfico 3 - Tensão máxima para solda Laser



As médias e desvio padrão para os alongamentos medidos estão presentes na tabela 6. As médias para o alongamento de 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 6.** Alongamento (%) para Solda Laser

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

As médias e desvio padrão para porcentagem de área soldada estão descritos na tabela 7. 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 7.** Porcentagem de área de solda (%) para Solda Laser.

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

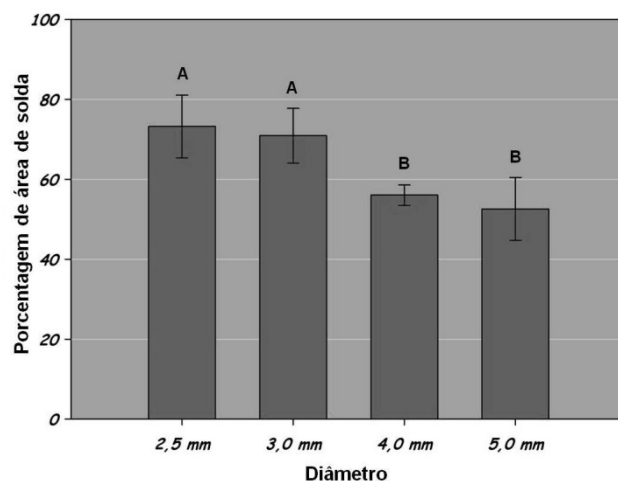


Gráfico 4 - Porcentagem de área de solda para solda Laser

As figuras abaixo (Figuras 20 à 23) são referentes às imagens obtidas na lupa estereoscópica para os corpos de prova soldados com Solda Laser após o ensaio de resistência à tração. As imagens demonstram que a solda não penetra por todo o diâmetro do corpo de prova, deixando o centro da amostra sem solda e este achado foi consistente em quase todas as amostras. Dos vinte corpos de prova dos grupos experimentais, dezenove fraturaram na área soldada.

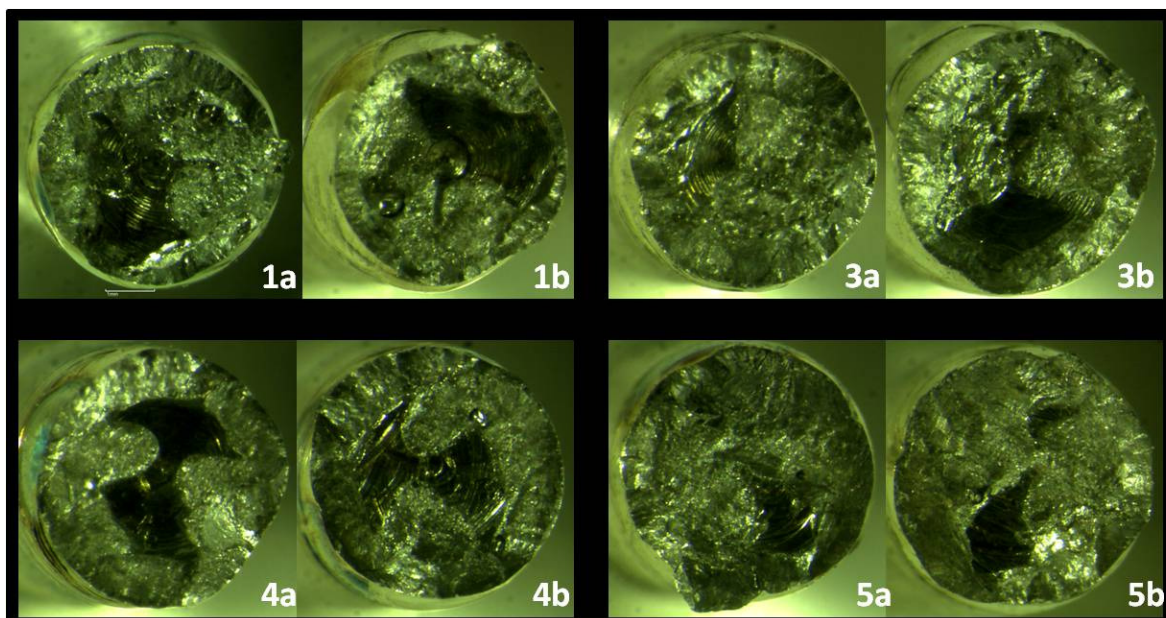


Figura 20– Imagens obtidas por meio de lupa estereoscópica para os corpos de prova do grupo L2.5.

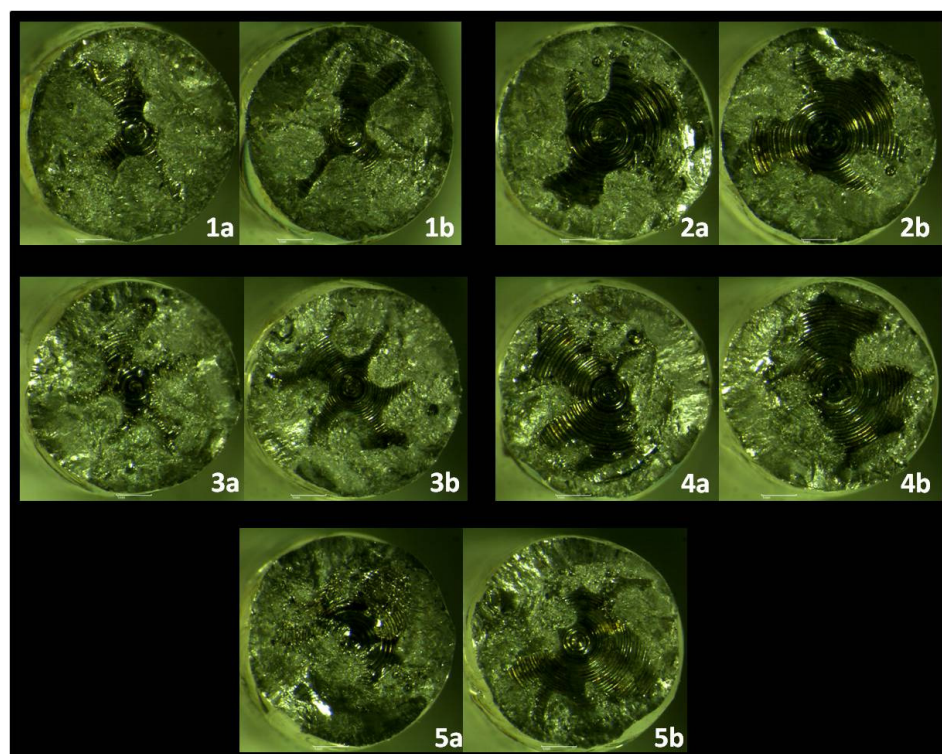


Figura 21– Imagens obtidas por meio de lupa estereoscópica para os corpos de prova do grupo L3.

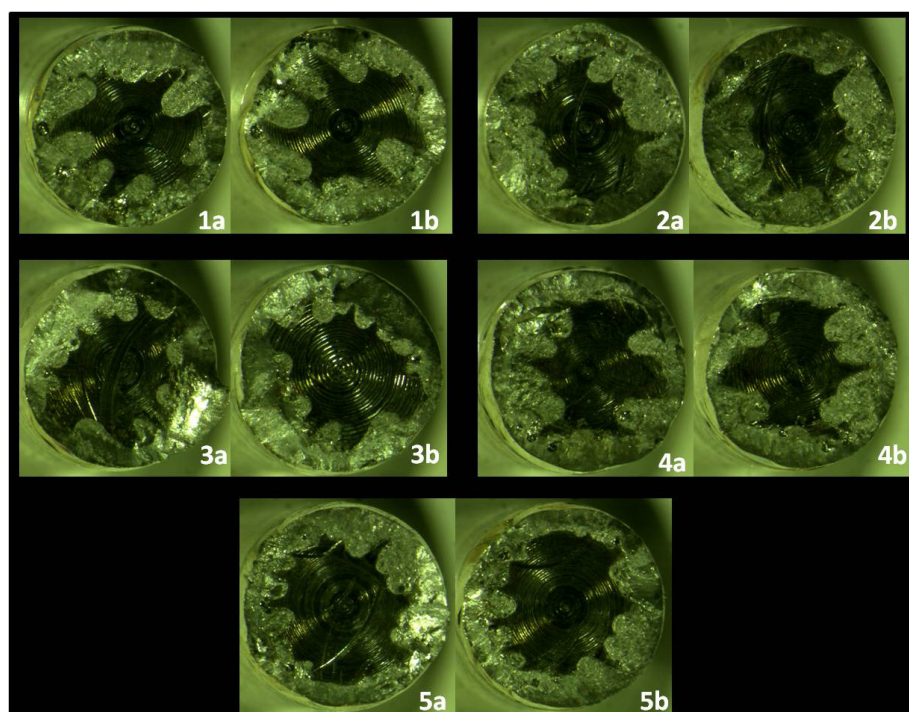


Figura 22– Imagens obtidas por meio de lupa estereoscópica para os corpos de prova do grupo L4.



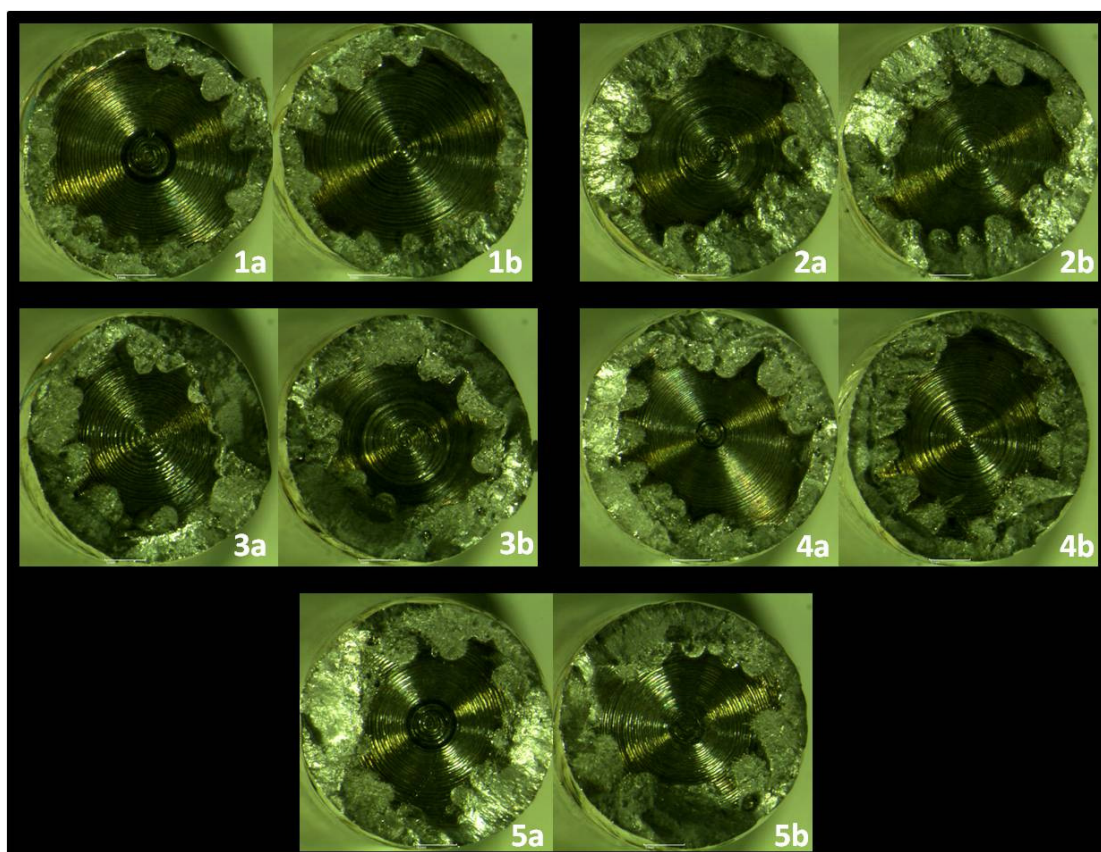
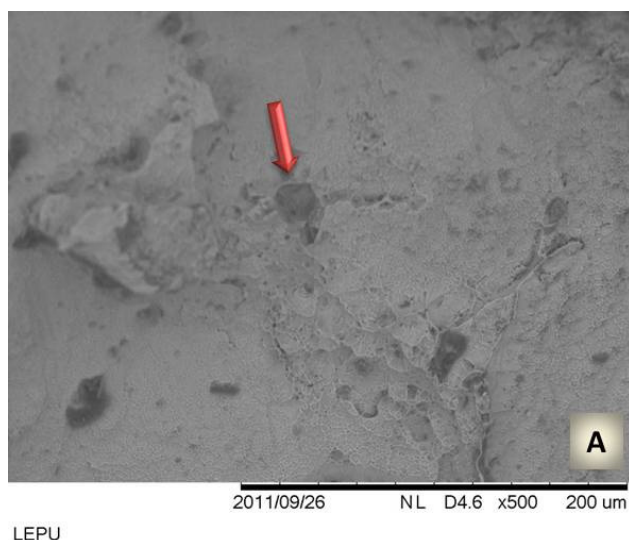
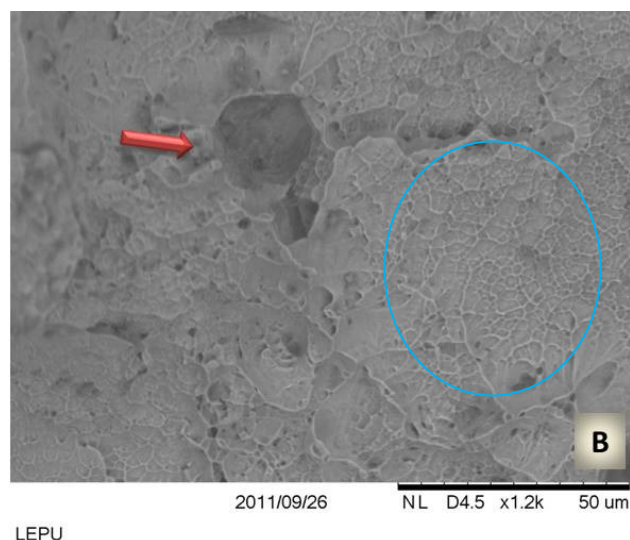


Figura 23 – Imagens obtidas por meio de lupa estereoscópica para os corpos de prova do grupo L5.

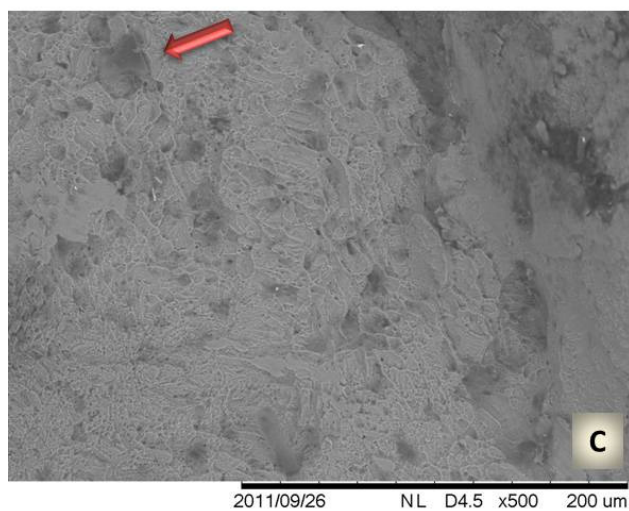
As Figuras 24 (a e c) são imagens de MEV (ampliação de 500x) da área de fratura da solda e as Figuras 23 (b e d) são imagens de MEV (aumento de 1200x). Elas revelam que a fratura na liga de Ti-6AL-4V tem uma superfície em geral plana, indicada pelos círculos azuis, regiões com uma forma de *colmeia* característica do Ti e mais característica de uma fratura frágil e contém ondulações superficiais (áreas mais elevadas em relação ao plano) indicadas pelo círculos vermelhos, chamadas de *dimples*, indicativas de uma pequena quantidade de ductilidade. Além disso, podem ser vistas algumas falhas como bolhas e porosidades apontadas pelas setas vermelhas.



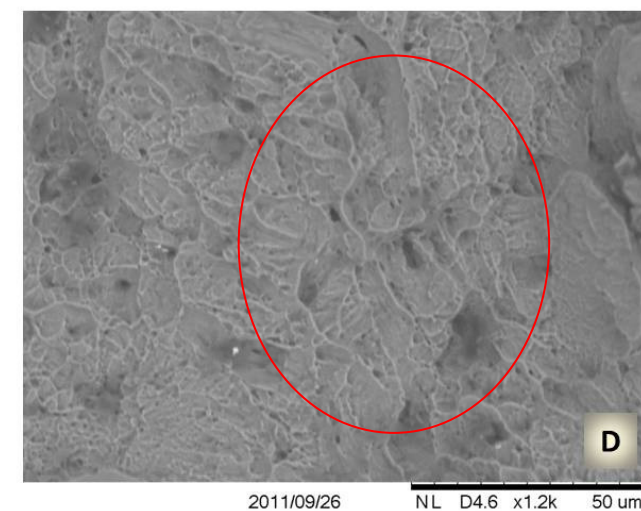
LEPU



LEPU



LEPU



LEPU

Figura 24: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.

Foi possível observar a partir do teste de correlação de Pearsons que houve correlação positiva.Quanto maior foi a tensão máxima maior foi a porcentagem de área soldada (0.472).A partir do teste de correlação de Spearman's foi possível observar que houve correlação negativa.Quanto menor foi o diâmetro do corpo de prova maior foi a porcentagem de área soldada (-0.807) e maior foi a tensão máxima (-0.535).

### 5.3 – Solda Plasma x Solda Laser

Comparando-se os valores de tensão máxima entre os diferentes tipos de solda, foi possível observar, por meio da tabela 8 que não houve diferença estatística entre os diferentes tipos de solda (solda Plasma e solda Laser) para todos os diâmetros.

**Tabela 8.** Comparação de médias  $\pm$ desvio padrão da tensão máxima (Mpa) 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 $\pm$ 133,58 <sup>a</sup>	601,93 $\pm$ 232,99 <sup>a</sup>	542,78 $\pm$ 179,98 <sup>a</sup>	515,57 $\pm$ 154,24 <sup>a</sup>
Plasma	627,32 $\pm$ 94,18 <sup>a</sup>	571,54 $\pm$ 108,64 <sup>a</sup>	434,82 $\pm$ 79,64 <sup>a</sup>	320,60 $\pm$ 38,68 <sup>a</sup>

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 tabela 9.

**Tabela 9.** Comparação de médias  $\pm$ 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 $\pm$ 1,88 <sup>a</sup>	1,07 $\pm$ 0,77 <sup>a</sup>	1,01 $\pm$ 0,32 <sup>a</sup>	0,78 $\pm$ 0,31 <sup>a</sup>
Plasma	1,60 $\pm$ 1,02 <sup>a</sup>	1,44 $\pm$ 0,94 <sup>a</sup>	0,38 $\pm$ 0,32 <sup>b</sup>	1,62 $\pm$ 0,93 <sup>a</sup>

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 tabela 10 sendo que os grupos soldados pelo processo Laser apresentaram as maiores porcentagens de área soldada que os grupos submetidos à solda Plasma.

**Tabela 10.** Comparação de médias  $\pm$ 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 $\pm$ 7,85 <sup>a</sup>	70,91 $\pm$ 6,85 <sup>a</sup>	56,03 $\pm$ 2,56 <sup>a</sup>	52,57 $\pm$ 7,88 <sup>a</sup>
Plasma	47,93 $\pm$ 5,44 <sup>b</sup>	43,80 $\pm$ 6,27 <sup>b</sup>	36,64 $\pm$ 4,92 <sup>b</sup>	26,61 $\pm$ 1,41 <sup>b</sup>

Em relação aos testes de correlação, foi possível observar a partir do teste de correlação de Pearson que quanto maior foi a tensão máxima maior foi a porcentagem de área soldada (0.659) e a partir do teste de correlação de Spearman's que quanto menor foi o diâmetro do corpo de prova maior foi a porcentagem de área soldada (-0.480) e maior foi a tensão máxima (-0.616).

#### 5.4. Método de Elementos Finitos (MEF)

Os valores obtidos pelos modelos de EF foram equiparados aos valores dos modelos experimentais para a deformação direcional no eixo Z, tanto para os corpos de prova intactos como para os corpos de prova soldados com solda Plasma e Laser para o diâmetro de 3mm para os deslocamentos selecionados. Para a tensão máxima principal os valores obtidos pelos modelos de EF apresentaram-se maiores em relação aos valores obtidos pelos modelos experimentais. Como pode ser visto nos gráficos e desenhos abaixo. Lembrando o exposto da parte de materiais e métodos, grupos experimentais neste momento referem-se ao corpos de prova submetidos ao ensaio experimental de tração.

##### 5.4.1. Controle

É possível perceber no gráfico tensão x deformação (figura 25) 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.

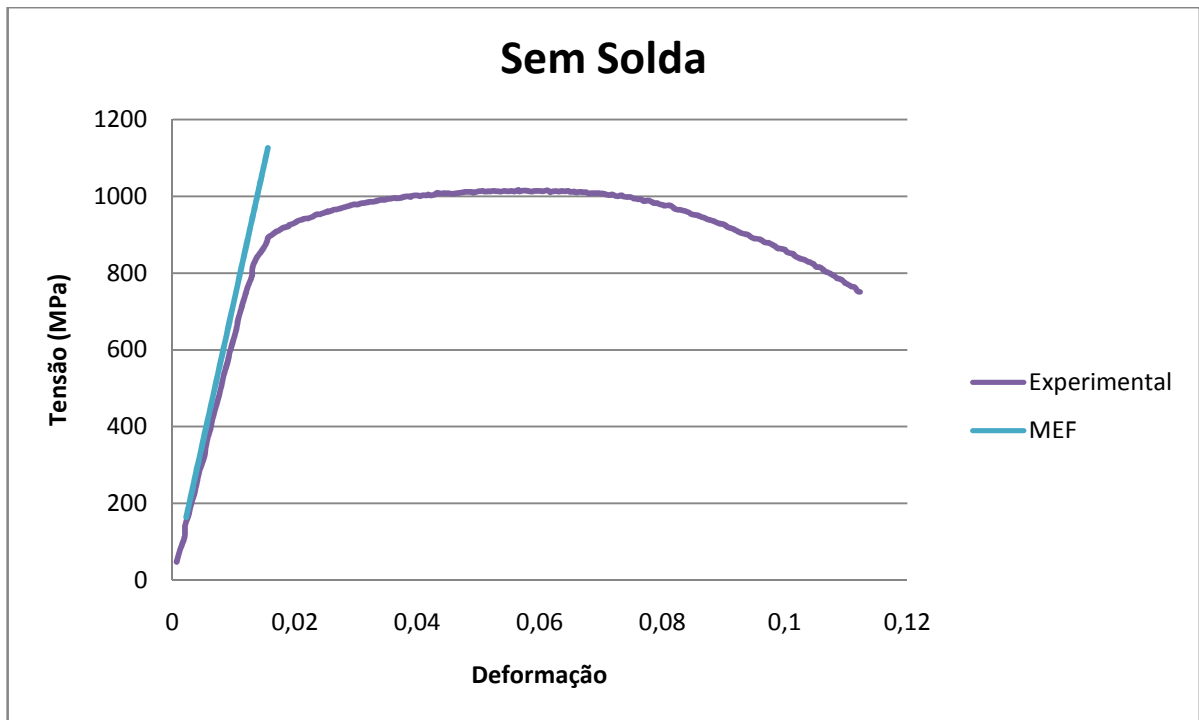


Figura 25 – Curva Tensão x deformação para o grupo controle e para o MEF.

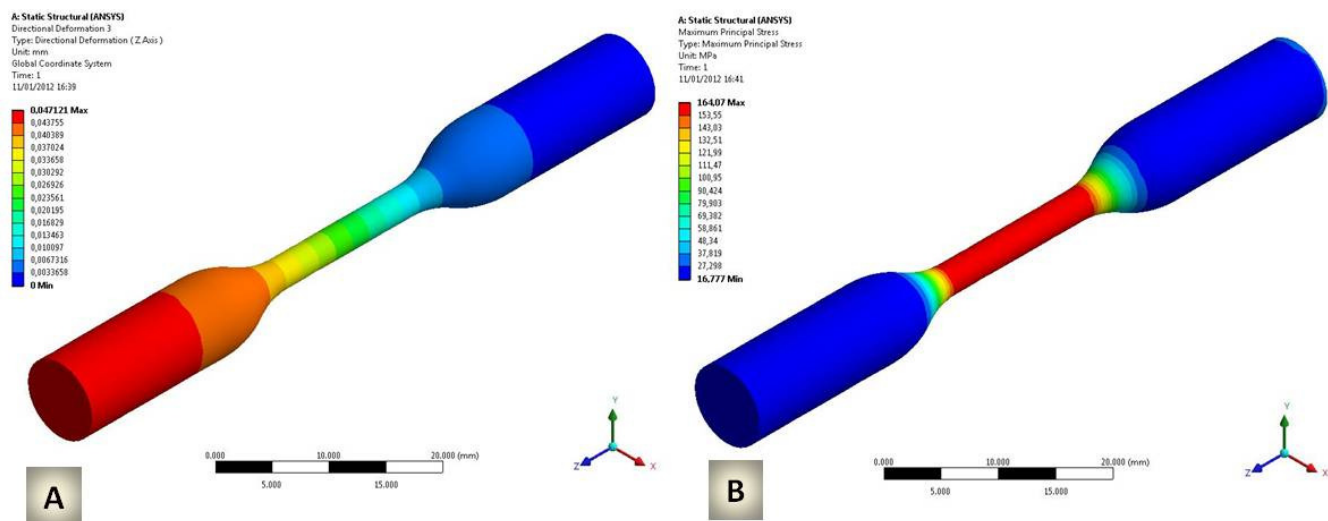


Figura 26: a) Imagem representativa da deformação direcional no eixo Z e b) Imagem representativa da tensão máxima principal para os corpos de prova intactos.



Foi possível perceber a partir de figura 26 a, que houve deslocamento ao longo de todo o corpo de prova e a partir da figura 26 b, que houve 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.

#### 5.4.2. Solda Plasma

É possível perceber no gráfico tensão x deformação (figura 27) que as curvas do grupo experimental e 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.

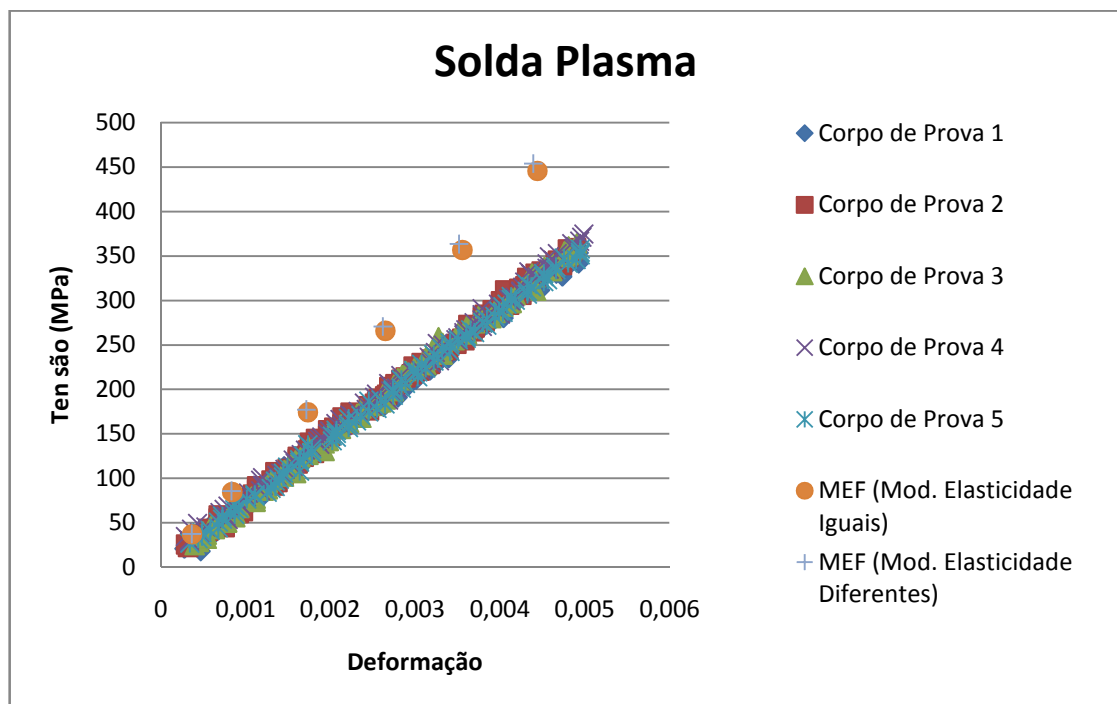


Figura 27 – Curva Tensão x deformação para o grupo controle e para o MEF.

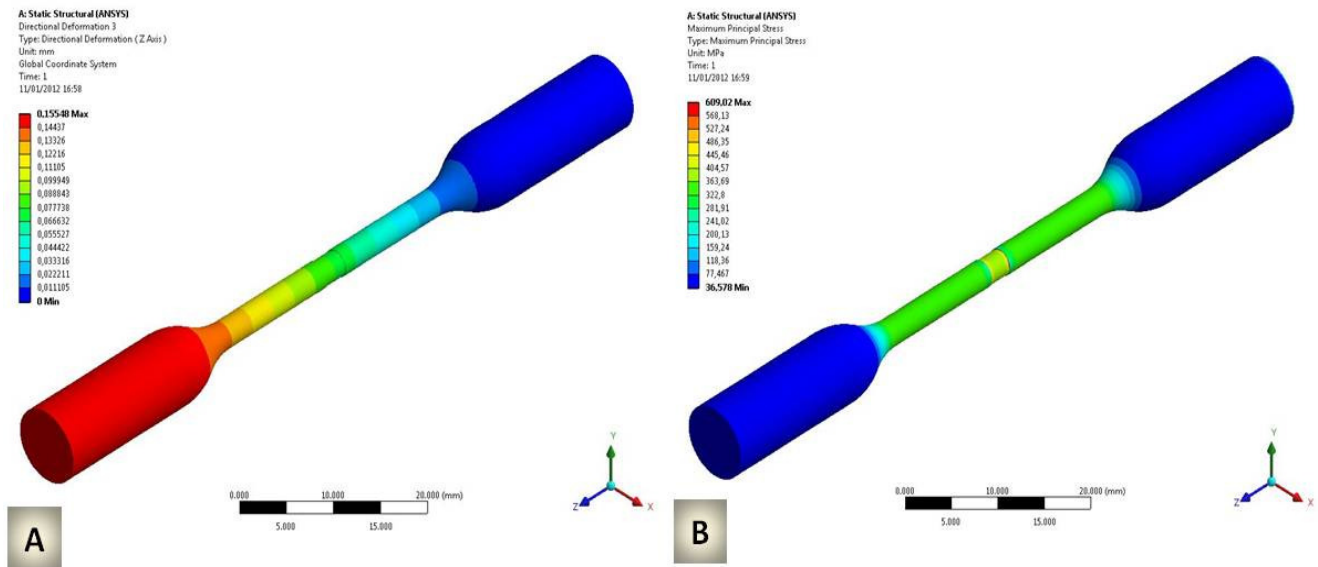


Figura 28: a) Imagem representativa da deformação direcional no eixo Z e b) Imagem representativa da tensão máxima principal para os corpos de prova intactos.

Foi possível perceber a partir de figura 28 a, que houve deslocamento ao longo de todo o corpo de prova e a partir da figura 28 b, que houve concentração de tensão na região correspondente à soldano corpo de prova, mostrando que a ruptura deste pode acontece nesta região.

#### 5.4.3. Solda Laser

É possível perceber no gráfico tensão x deformação (figura 29) 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.

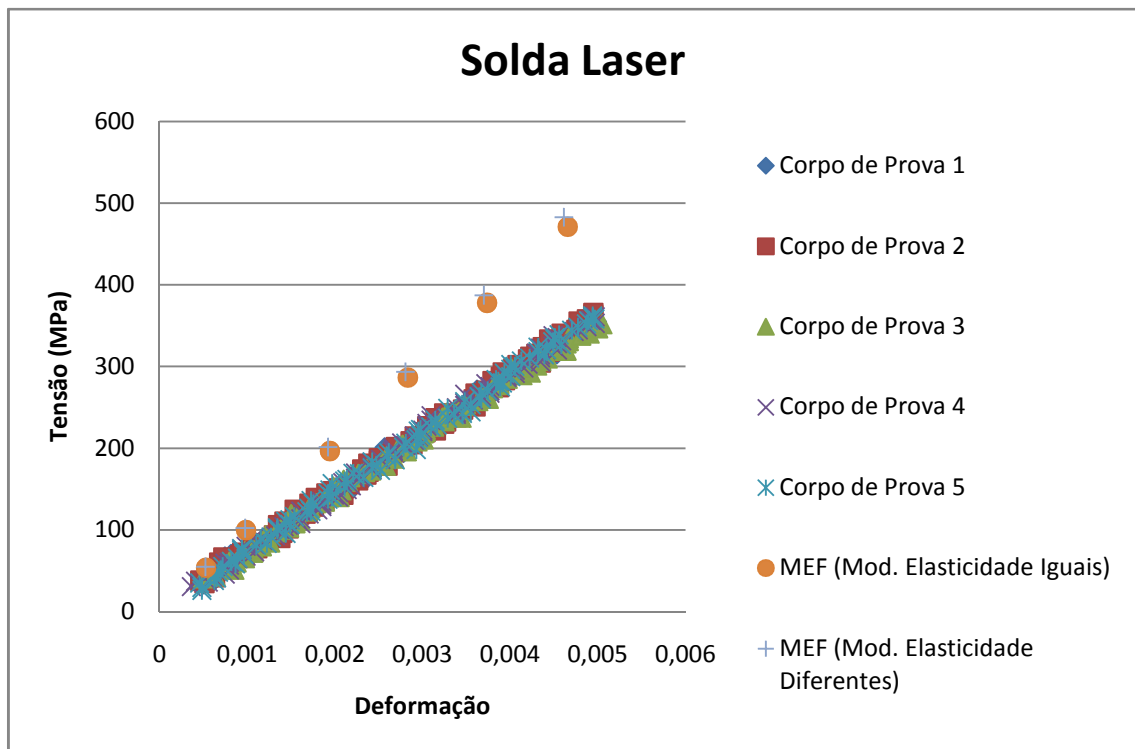


Figura 29 – Curva Tensão x deformação para o grupo controle e para o MEF.

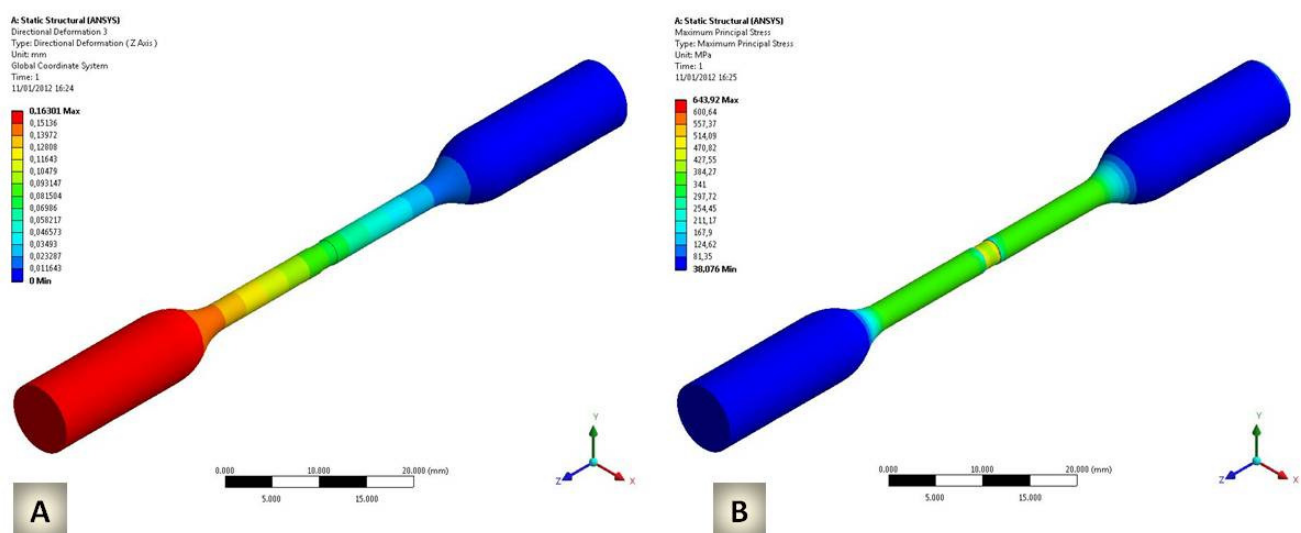


Figura 30: a) Imagem representativa da deformação direcional no eixo Z e b) Imagem representativa da tensão máxima principal para os corpos de prova intactos.

Foi possível perceber a partir de figura 30 a, que houve deslocamento ao longo de todo o corpo de prova e a partir da figura 30 b, que houve concentração de tensão na região correspondente à solda no corpo de prova, mostrando que a ruptura deste pode acontecer nesta região.

## 6. 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; Srimaneeponget *et al.*, 2008) que afirmaram que quando as condições de soldagem forem adequados, a resistência mecânica das uniões soldadas é 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 (Figura 26b) e nos grupos soldados por Plasma e Laser (Figuras 28a e 30a) 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 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 no processo de soldagem a arco como desoldagem Laser, é o fato de que 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 ductilidade (Berg *et al.*, 1995) pode ser observada nas figuras 18 e 23 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 baixa 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

significante ( $p < .05$ ) 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 curto período de tempo, sob aplicação de tensões inferiores às aquelas 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 secção 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 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 estruturas soldadas à Laser. Neste trabalho houve correlação positiva entre porcentagem de área soldada e tensão máxima tanto para a solda Laser (0.472) quanto para a solda Plasma (0.981), mostrando que a penetração é um fator a ser considerado nos valores de resistência à tração.

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.

Avaliando, portanto, a área de solda, as análises estatísticas demonstraram que os maiores valores de porcentagem de área soldada foram obtidos pelos corpos de prova de menor diâmetro independentemente do tipo de solda e que houve correlação negativa entre porcentagem de área soldada e diâmetro da amostra tanto para a Solda Laser (-0.807) quanto para Solda Plasma (-0.869), e como há correlação positiva entre resistência à tração e porcentagem de área de solda, houve, portanto, correlação também negativa entre o diâmetro da amostra e a resistência à tração tanto para solda Laser (-0.535) quanto para a solda Plasma (-0.830). Resultados semelhante foram encontrados por Lin *et al.*, 2007, em que a redução do diâmetro das amostras e/ou o aumento da energia de soldagem, aumentaram a porcentagem de área soldada, resultando em aumento da resistência à fratura de uniões soldada de Ti por meio

de solda Laser e por Sjögren *et al.*, 1988, que observou que dentre as amostras submetidas à soldagem, as de maior diâmetro (5,0 mm) apresentaram menores valores de resistência à tração, e atribuíram estes resultados à menor velocidade de esfriamento, acarretando em microestrutura mais grosseira de infraestruturas de maior diâmetro.

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 à maior profundidade de penetração da solda e a duração do pulso determina o diâmetro do ponto de solda, que será maior se 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 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 poderiam 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 regulação 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 5 mm 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'. Na junta em formato de 'X', o centro é mantido justaposto, 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).

Por outro lado, há dificuldade de se trabalhar com solda Plasma, no que concerne ao afiamento do eletrodo de tungstênio, que deve ser feito de maneira constante. Caso não tenha um eletrodo devidamente afiado com as especificações corretas nas normas internacionais do uso do equipamento Plasma, não é possível se obter uma solda de boa qualidade. Assim o tempo de trabalho comparativamente ao da solda Laser é maior, o que talvez prejudicasse o fluxo de trabalho dentro de um laboratório de prótese. Porém, existem hoje no mercado apontadores de eletrodo de tungstênio que agilizam esta etapa e garantem um afiamento adequado do eletrodo.

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 à técnica laser, se observarmos com atenção o gráfico 3, notamos que o grupo laser mesmo não apresentando diferença estatística significativa com o grupo plasma (tabela 9), apresenta resultados mais uniformes em todos os seus diâmetros (gráfico 3).

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 as técnicas plasma e laser. Este primeiro modelo desenvolvido consideratoda 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.

## **7. CONCLUSÃO**

Dentro das limitações deste estudo, os diâmetros 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.

## **8. REFERÊNCIAS**

1. Akman, E.; Demir, A.; Anel, T.; Sinmazçelik, T. Laser welding of Ti6Al4V titanium alloy. *Journal of materials processing technology*. 2008.
2. American Welding Society - AWS, Rules for welding in structural steel / 1992.
3. 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.
4. Anusavice, K.J. Phillips, materiais dentários. 11 ed. Rio de Janeiro: Elsevier; 2005.

5. Araújo, D.B. *Metodologia para o uso de simulação física no estudo da ZAC e na obtenção de diagramas CCT para soldagem*. 2008.118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2008.
6. Baba, N.; Watanabe, I. Penetration depth into dental casting alloys by Nd:YAG laser. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, v.72, n. 1, p.64-68, 2004.
7. Blackman, R.; Barghi, N.; Tran, C. Dimensional changes in casting titanium removable partial denture frameworks. *J Prosthet Dent*, v. 65, n. 2, p. 309-315, 1991.
8. Berg, E; Wagner, W.C; Davik, G. Dootz, E.R. Mechanical properties of laser-welded cast and wrought titanium. *J Prosthet Dent*, v. 74, p. 250-257, 1995.
9. Bergman, M. Cast titanium in dental constructions. DPNOVA AB Malmo: Sweden, Aug. 1990. [Manual].
10. Byrne, G. Soldering in Prosthodontics—An Overview, Part I. *Journal of Prosthodontics*, v. 20, n. 3, p. 233-243, 2011.
11. Botega, D.M. *Resistência a tração do titânio comercialmente puro soldado a laser em diferentes distâncias a diâmetros*. 2005. 74 f. Tese (Doutorado em Odontologia) - Faculdade de Odontologia de Piracicaba. Universidade Estadual de Campinas, Piracicaba. 2005.
12. Chai. T.; Chou, C.K. Mechanical properties of laser-welded cast titanium joints under different conditions. *J Prosthet Dent*, v. 79, n. 4, p. 477-483, 1998.
13. 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*, v. 40, p. 1059-1070, 2004.
14. Craig, R.G. et al. Cast and wrought base metal alloys. In: *Restorative dental materials*. Saint Louis: Mosby, 1997. p.428-432.

15. Gordon, T.E.; Smith, D.L. Laser welding of prostheses – an initial report. *J Prosthet Dent*, v. 24, n. 4, p. 472-476, 1970.
16. Hart, C.N.; Wilson, P.R. Evaluation of welded titanium joint used with cantilevered implant-supported prostheses. *J Prosthet Dent*, v. 96, p. 25-36, 2006.
17. Lin, M.C.; Lin, S.C.; Wang, Y.T.; Hu, S.W.; Lee, T.H.; Chen, L.K.; Huang, H. Fracture resistance of Na:YAG Laser-welded cast titanium joints with various clinical thicknesses and welding pulse energies. *Dental Materials Journal*, v. 26, n. 3, p. 367-372, 2007.
18. Liu, J.; Watanabe, I.; Yoshida, K.; Atsuta, M. Joint strength of laser-welded titanium. *Dent Mater*, v. 18, p. 143-148, 2002.
19. Marques, P.V. Tecnologia da soldagem. Belo Horizonte: ESAB, 1991. 352p.
20. Meadows, C.; Fritz, J.D. Understanding Stainless Steel Heat-Affected Zones. *Welding Journal*, p. 26-30, 2005.
21. Neo, T.K.; Chai, J.; Gilbert, J.L.; Wozniak, W.T.; Engelman, M.J. Mechanical properties of titanium connectors. *Int J Prosthodont*, v. 9, n. 4, p. 379-393, 1996.
22. 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.
23. Nuñez-Pantoja, J.M.; Vaz, L.G.; Nóbilo, M.A.; Henriques, G.E.; Mesquita, M.F. Effects of laser-weld joint opening size on fatigue strength of Ti-6Al-4V structures with several diameters. *J Oral Rehabil*, v. 38, p. 196-201, 2011.
24. Rade, D.A. Apostila Método dos Elementos Finitos, Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

25. Ramirez, J.E.; Mishael, S.; Shockley, R. Properties and Sulfide Stress Cracking Resistance of Coarse-Grained Heat-Affected Zones in V-Microalloyed X60 Steel Pipe. *Welding Journal*, p. 113-123, 2005.
26. Rocha, R.; Pinheiro, A.L.; Villaverde, A.B. Flexural strength of pure Ti, Ni-Cr and Co-Cr alloys submitted to Nd:YAG laser or TIG welding. *Braz Dent J*, v. 17, n.1, p. 20-23, 2006.
27. Roggensack, M.; Walter, M.H.; Boning, K.W. Studies on laser- and plasma-welded titanium. *Dent Mater*, v. 9, n. 2, p. 104-107, 1993.
28. Silva, J. *Avaliação da Resistencia flexural entre diferentes métodos de soldagem: chama direta, TIG e laser*. 2007. 109 f. Dissertação(Mestrado em Odontologia) - Faculdade de Odontologia de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto. 2007.
29. 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, v. 44, n. 01, 2008.
30. Sjögren, G.; Andersson, M.; Bergman, M. Laser welding of titanium in dentistry. *Acta Odontol Scand*, v. 46, p. 247-253, 1988.
31. Shimakura, M.; Yamada, S.; Takeuchi, M.; Miura, K.; Ikeyama, J. Influence of irradiation conditions on the deformation of pure titanium frames in laser welding. *Dental Materials Journal*, v. 28, n. 2, p. 243-247, 2009.
32. Srimaneeponga, V.; Yoneyama, T.; Kobayashi, 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.
33. Tambasco, J.; Anthony, T.; Sandven, O. Laser welding in the dental laboratory: an alternative to soldering. *J Dent Technol*, v. 13, n. 4, p. 23-31, 1996.
  34. 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*, v. 79, p. 291-297, 1998.
  35. 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.
  36. Tiossi, R.; Falcão-filho, H.; Aguiar Júnior, F.A.; Rodrigues, R.C.; Mattos, M. da G.; Ribeiro, R.F. Modified section method for laser-welding of ill-fitting cp Ti and Ni-Cr alloy one-piece cast implant-supported frameworks. *Journal of Oral Rehabilitation*, v. 37, p. 359-363, 2010.
  37. Wang, R.R.; Chang, C.T. Thermal modeling of laser welding for titanium dental restorations. *J Prosthet Dent*, v. 79, n. 3, p. 335-341, 1998.
  38. Wang, R.R.; Fenton, A. Titanium for prosthodontic applications: a review of the literature. *Quintessence Int*, v. 27, n. 6, p. 401-408, 1996.
  39. Wang, R.R.; Welsch, G.E. Joining titanium materials with tungsten inert gas welding, laser welding, and infrared brazing. *J Prosthet Dent*, v. 74, n. 5, p. 521-530, 1995.
  40. Wataha, J.C. Biocompatibility of dental casting alloys: a review. *The journal of prosthetic dentistry*, v. 83, n.2, p. 223-234, 2000.



41. Watanabe, F.; Uno, I.; Hata, Y.; Neuendorff, G.; Kirsch, A. Analysis of stress distribution in a screw-retained implant prosthesis. *Int J Oral Maxillofac Implants*, v. 15, n. 2, p. 209-218, 2000.
42. Watanabe, I.; Topham, D.S. Laser welding of cast titanium and dental alloys using argon shielding. *J Prosthodont*, v. 15, p. 102-107, 2006.
43. Wee, A.G.; Aquilino, S.A.; Schneider, R.L. Strategies to achieve fit in implant prosthodontics: a review of the literature. *Int J Prosthodont*, v. 12, n. 2, p. 167-178, 1999.
44. Williams, D.F. Titanium and titanium alloys. In: Biocompatibility of clinical implant materials. Boca Raton: CRC Press, 1984, p. 44-47.
45. Wiskott, H.W.; Macheret, F.; Bussy, F.; Belser, U.C. Mechanical and Elemental characterization of solder joints and welds using a gold-palladium alloy. *J Prosthet Dent*, v. 77, n. 6, p. 607-616, 1997.
46. Yamagishi, T.; Ito, M.; Fugimura, Y. Mechanical properties of laser welds of titanium in dentistry by pulsed Nd:YAG laser apparatus. *J Prosthet Dent*, v. 70, n. 3, p. 264-273, 1993.
47. Zavanelli, R.A.; Guilherme, A.S.; Pessanha-Henriques, G.E.; Nobilo, M. A. A.; Mesquita, M. F. Corrosion-fatigue of laser-repaired commercially pure titanium and Ti-6Al-4V alloy under different test environments. *J Oral Rehabil*, v. 31, n. 10, p. 1029-1034, 2004.
48. Zupancic, R.; Legat, A.; Funduk, N. Tensile strength and corrosion resistance of brazed and laser-welded cobalt-chromium alloy joints. *J Prosthet Dent*, v. 96, n. 4, p. 273-282, 2006.