

**ASBEL RODRIGUES MACHADO**

**Efeito do Desenho de Junções e Tipo de Solda na  
Resistência Flexural de Barras de Liga de Ti-6Al-4V**

**UBERLÂNDIA**

**2013**

**ASBEL RODRIGUES MACHADO**

## **Efeito do Desenho de Junções e Tipo de Solda na Resistência Flexural de Barras de Liga de Ti-6Al-4V**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Odontologia, da Faculdade de Odontologia, da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Odontologia – Área de concentração Clínica Odontológica Integrada.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Simamoto Júnior

### **BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Paulo César Simamoto Júnior - UFU

Prof. Dr. Clébio Domingues da Silveira Júnior – UFU

Prof. Dr. Mauro Antônio de Arruda Nóbilo – UNICAMP

**UBERLÂNDIA**

**2013**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

M149e Machado, Asbel Rodrigues, 1960-  
2013 Efeito do desenho de junções e tipo de solda na resistência flexural de barras de liga de Ti-6AL-4V / Asbel Rodrigues Machado. -- 2013. 86 f. : il.

Orientador: Paulo César Simamoto Júnior.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Odontologia.  
Inclui bibliografia.

1. Odontologia - Teses. 2. Solda e soldagem - Teses. 3. Titânio - Soldagem - Teses. I. Simamoto Júnior, Paulo César. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Odontologia. III. Título.

---

CDU: 616.314

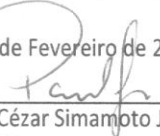


SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ODONTOLOGIA

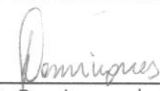
ATA DA COMISSÃO JULGADORA DA **237ª DEFESA** DE MESTRADO DO (A) **ASBEL RODRIGUES MACHADO** DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ODONTOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA.

Às quatorze horas do dia **dezoito de fevereiro do ano de dois mil e treze**, reuniu-se a Comissão Julgadora aprovada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia, para o julgamento da Dissertação de Mestrado apresentada pelo aluno (a), **ASBEL RODRIGUES MACHADO** com o título, *"Efeito do desenho de junções e tipo de solda na resistência flexural de barras de liga de Ti-6Al-4V."* O julgamento do trabalho foi realizado em sessão pública compreendendo a exposição, seguida de arguição pelos examinadores. Encerrada a arguição, cada examinador, em sessão secreta, exarou o seu parecer. A Comissão Julgadora, após análise do Trabalho, verificou que o mesmo encontra-se em condições de ser incorporado ao banco de Dissertações e Teses da Biblioteca desta Universidade. Acompanham este relatório os pareceres individuais dos membros da Comissão Julgadora. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, legislação e regulamentação da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos às 17 horas e — minutos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.


Uberlândia, 18 de Fevereiro de 2013

  
Prof. Dr. Paulo César Simamoto Júnior  
Titulação: Doutor  
Universidade Federal de Uberlândia – UFU

  
Aprovado/Reprovado

  
Prof. Dr. Clébio Domingues da Silveira Júnior  
Titulação: Doutor  
Universidade Federal de Uberlândia - UFU

  
Aprovado/Reprovado

  
Prof. Dr. Mauro Antônio de Arruda Nóbilo  
Titulação: Doutor  
Faculdade de Odontologia da Unicamp- Piracicaba

  
Aprovado/Reprovado

## **DEDICATÓRIA**

A **Deus**, criador e mantenedor da vida, pelas inúmeras portas abertas e pela proteção durante minha caminhada;

À minha amada esposa **Paula**, pelo amor, compreensão e paciência durante mais esta jornada. Pelo incentivo, pela renúncia e pelo apoio, especialmente nos momentos mais difíceis. Saiba que esta vitória é sua também, pois sem você eu não chegaria até aqui;

Ao meu amado filho **Rafael**, maior benção da minha vida e razão para continuar lutando em busca de dias melhores. Pelo seu sorriso aberto que dissipa toda tristeza ou angústia que os percalços da vida por vezes nos infringem;

Aos meus pais, **Nestor** (*in memoriam*) e **Jandira**. Pelo amor, carinho, compreensão e dedicação com que me educaram, mas especialmente pelo exemplo de vida, de fé, de honestidade e sabedoria com que me presentearam durante todos esses anos de nossas vidas. A vocês meu eterno respeito, amor e gratidão.

Aos meus irmãos e irmãs, **Euribes, Silas, Paulo, Mary, Rui** (*in memoriam*), **Armando, Júnior, Marise e Márcia**. Mais que os laços de sangue, nos unem a amizade, o companheirismo, o amor, o respeito e a admiração;

Aos meus sogros **Galvão** (*in memoriam*) e **Helena**, por me acolherem em sua família como um filho e por partilharem comigo, mesmo que de longe, as vitórias, alegrias e até mesmo as dificuldades, mas sempre com fé e esperança no coração.

Às minhas queridas cunhadas, **Cida, Eunice, Laudicéia, Marly, Marta e Darc**. Obrigado por tantos momentos felizes reunidos como uma só família;

Aos meus cunhados **Rosana e Sandro, Marcela e Peterson e Mariana**. Obrigado pela amizade, incentivo e orações.

A todos meus queridos **sobrinhos e sobrinhas**, por tantas alegrias compartilhadas em família.

**A TODOS VOCÊS DEDICO ESTE TRABALHO**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador **Prof. Dr. Paulo César Simamoto Júnior**, mais que um mestre, um amigo. Exemplo a ser seguido, pela dedicação, competência e pelo carisma e alegria com que brinda a todos que tem o privilégio de conviver e aprender ao seu lado. A você, minha mais profunda gratidão por ter me acolhido em um momento difícil e pela paciência e perseverança com que me conduziu na execução deste trabalho.

A **Profa. Dra. Veridiana Novais Simamoto**, não apenas pelos muitos ensinamentos durante as aulas, mas também pelo exemplo de conduta, de ética e de vida que nos transmitiu durante esse tempo tão bom em que pudemos conviver. Muito obrigado por ter me acolhido juntamente com o Prof. Paulo Simamoto. Minha eterna gratidão a vocês.

Ao **Prof. Dr. Carlos José Soares**, pelo exemplo de dedicação, profissionalismo e profundo amor pela pesquisa e pelo ensino. Agradeço especialmente por ter permitido que eu buscasse novos caminhos no decorrer do mestrado, proporcionando condições para que eu concluísse esta importante etapa de minha vida profissional. Agradeço também pelas valiosas orientações e por não medir esforços em colaborar na finalização desse trabalho. A você minha sincera e eterna gratidão.

Ao **Prof. Dr. Murilo Menezes**, pela prontidão em participar de minha qualificação e pelas valiosas sugestões e orientações a respeito da finalização deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-graduação – Curso de Mestrado, **Flávio Neves, Darceny Zanetta, Sérgio Vitorino, Célio Jesus do Prado, Denildo Magalhães, Alfredo Júlio, Paulo Vinícius, Liliane Parreira, Gisele Rodrigues, Henner Gomide**, e a todos os demais professores do curso de Odontologia, meu muito obrigado por tantos ensinamentos, não somente profissionais, mas principalmente de vida.

Ao grupo de pesquisa vinculado ao Prof. Paulo: **Morgana**, obrigado por compartilhar comigo seu conhecimento e vivência com os processos de soldagem e principalmente pela atenção, cuidado e carinho com que sempre me tratou; **Luisa**, obrigado pela ajuda nas várias etapas, pelo carinho e pelo sorriso sempre presente em seu rosto durante a realização dos experimentos desta pesquisa; **Polliana**, obrigado pela paciência em me ajudar no início da pesquisa e em todos os momentos que precisei; **Matheus**, obrigado pela força com a soldagem TIG e por tantos outros momentos em que você não mediu esforços para contribuir; **Leandro**, obrigado pela força e persistência, mesmo quando



não dava nada certo na captura das imagens e você persistiu em estar ao lado dando força para que tudo desse certo; **João Paulo Lyra**, pela inestimável ajuda com o MEV e pelas correções e orientações na execução deste trabalho; **Luiz Raposo**, pela força na elaboração e correção da dissertação. A todos vocês meu mais sincero agradecimento e eterna gratidão.

Aos colegas do mestrado, **Marcos Bilharinho, Luisa, Cristhiane, Thiago, Marcel, Hanny Angelis, Keller, Giovana, Lais, Juliana, Fabiana, Maiolino, Aline, Patrícia, Kellen, Marina, Ana Luiza, Manuella, e Rayssa**. Obrigado por tantos momentos alegres e descontraídos que ficarão para sempre em nossas memórias – e até pelos momentos tensos de apresentação de seminários, depois de uma noite mal dormida ou, não raramente, passada em claro para dar tempo de finalizar a apresentação. E pela paciência de todos vocês em assistir e participar dessas aulas de um professor aprendiz. A todos vocês meu carinho, respeito e gratidão. Estarão sempre em meu coração.

Aos meus colegas de mestrado (turma anterior como aluno especial), especialmente ao **Júlio, Aline, Danilo, Marcos Pains e Douglas** pela atenção e consideração com que sempre me receberam. A vocês minha admiração e sinceros votos de sucesso.

Aos meus colegas de mestrado (turma seguinte), em especial aos colegas **Adalberto, Alexandre, Tadashi, Késia e Renata**. Sucesso a todos vocês.

Ao **Léo e Simone** pelo carinho, respeito e amizade que cultivamos nestes anos de convivência aqui em Uberlândia. Obrigado pela força na estatística e na montagem das tabelas desta dissertação. Acima de tudo obrigado pela consideração que vocês têm por mim, pela Paula e pelo Rafael. Tenham sempre a certeza que isso é recíproco, para com vocês e seus filhos.

Ao meu amigo **Eder Rangel**, sua esposa **Raquel** e ao seu filhinho **Artur Henrique**, obrigado pela amizade e carinho, por terem me recebido em Uberlândia como a um irmão e por tantos momentos felizes que nossas famílias viveram juntos.

Ao meu amigo **Keuler Rangel**, sua esposa **Luciana** e suas filhas **Melissa e Mila** obrigado pela convívio fraternal e por tantas vezes nos receber em sua casa para momentos alegres e descontraídos em família.

Às Secretarias do programa de Mestrado, **Graça** e **Aline**, agradeço pela dedicação e paciência que dedicaram a mim, todas as vezes que precisei de vocês.

A empresa Sigma Radiologia Odontológica, **aos nossos funcionários** pela força em tantos momentos de ausência, especialmente à minha sócia **Dra. Fernanda Cecílio Dias**, pela compreensão, paciência e sacrifício em fazer mais do que lhe cabia nas tarefas da clínica, em função de minha ausência, sem nunca me cobrar ou reclamar. A você, meu muito obrigado e eterna gratidão.

Ao Laboratório de prótese do **Sr. Marco Aurélio Galbiatti** que gentilmente cedeu o serviço de soldagem para esta pesquisa. Ao seu funcionário **Tiago** que se empenhou em realizar a soldagem em tempo hábil para que pudéssemos concluir este trabalho.

Ao **Lipo** (Laboratório Integrado de Pesquisa Odontológica) por disponibilizar os equipamentos para a realização desta pesquisa.

À **Escola Técnica de Saúde** por disponibilizar o laboratório de Prótese para este trabalho.

À **Faculdade de Odontologia de Piracicaba - Unicamp** pela realização da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

À **Universidade Federal de Uberlândia (UFU)**, ao quadro de professores e técnicos administrativos agradeço por ter tido o privilégio de entrar pelas portas desta tão conceituada instituição. Isto será motivo de orgulho por toda a minha vida.

À **CAPES** pela bolsa de mestrado durante um período do curso.



**“O coração do homem pode fazer planos, mas a resposta certa dos lábios vem do SENHOR”**

**Provérbios 16 (1)**



<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b>	01
<b>RESUMO</b>	05
<b>ABSTRACT</b>	07
<b>1.INTRODUÇÃO</b>	09
<b>2.REVISÃO DA LITERATURA</b>	12
2.1. Soldagem à Laser	13
2.2. Soldagem TIG	20
2.3. Métodos não destrutivos para avaliação de processos de soldagem	25
<b>3. PROPOSIÇÃO</b>	28
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b>	30
4.1. Delineamento experimental	31
4.2. Confecção e preparo dos corpos de prova	31
4.3 O processo de soldagem	34
4.4 O processo de soldagem Laser	35
4.5. Análises não destrutivas para avaliação da qualidade da solda	36
4.6. Mesa para ensaio	39
4.7 Ensaio mecânico de flexão	40
4.8. Mensuração da área soldada	41
4.9. Análise por meio de microscopia eletrônica de varredura [MEV]	42
4.10 . Cálculo da tensão de flexão	43
4.11. Análise estatística	43
<b>5. RESULTADOS</b>	45
5.1 Tensão máxima de flexão	46
5.2. Área soldada	48
5.3 Correlação de Pearson	50
5.4. MEV	51
<b>6. DISCUSSÃO</b>	53
<b>7. CONCLUSÕES</b>	59
<b>REFERÊNCIAS</b>	61
<b>ANEXOS</b>	66
Anexo 1	67
Anexo 2	71
Anexo 3	83

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

A – Amper

Al – Alumínio

Au – Ouro

AWS – American Welding Society

°C – Graus Celsius

cm – centímetros

cm<sup>2</sup> – centímetro quadrado

cm<sup>3</sup> – centímetro cúbico

Co – Cobalto

Cr – Cromo

Cu – Cobre

cp – comercialmente puro

DP – Desvio padrão

EDS – Espectroscopia de energia dispersiva

3D – tridimensional

g – grama

*gap* – distância entre duas estruturas

GL – °Gay Lussac

h – hora

Hz – Hertz

J – joules

Kv – quilovolt

L – litros



ms – mili-segundos

mm – milímetros

mm<sup>3</sup> – milímetro cúbico

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MPa – Megapascal

mA – miliamper

min – minuto

N – Newton

Nb – Nióbio

Nd – Neodímio

Ni – Níquel

P – pulso

Pd – Paládio

Pt – Prata

s – segundo

Ti– Titânio

TIG – Tugsten inert gas

V – Vanádio

V– Volts

YAG – Granada de ítrio e alumínio

ZAC – Zona Afetada pelo Calor

$\alpha$  – nível de confiabilidade

° – grau

μm– micrômetro

% – porcentagem



O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de diferentes desenhos de junções e dos processos de soldagem *Tungsten Inert Gas* (TIG) e Laser, na resistência flexural de barras de liga de Ti-6Al-4V. Setenta espécimes com dimensões de 3,18mm de diâmetro e 40mm de comprimento foram divididos em sete grupos (n=10): C, grupo controle (intactos); grupos TI, TX30° e TX45° com junções chanfradas em 0°, 30° e 45° respectivamente, soldadas a TIG; e Grupos LI, LX30° e LX45° com junções chanfradas em 0°, 30° e 45° respectivamente, soldadas à Laser. Após ensaio mecânico de flexão os valores de resistência à fratura (N) foram convertidos em tensão máxima de flexão (MPa) e as superfícies de fratura foram mensuradas para obter as áreas soldadas. Os dados foram inicialmente submetidos à Análise de Variância Fatorial (2 x 3) seguido do teste de Tukey. Em seguida, apenas os dados de tensão máxima de flexão foram analisados com Análise de Variância em fator único seguido do teste de Dunnett para verificar a diferença entre o grupo controle e os seis grupos experimentais. Foi aplicada a correlação de Pearson para os fatores tipo de solda e tipo de junção. Para todos os testes foram consideradas diferenças estatística para  $\alpha=0,05$ . O teste de Dunnett mostrou que os grupos TX30° (p=0,990) e TX45° (p=0,995) resultaram em valores de tensão máxima de flexão semelhante ao grupo controle. Os demais grupos experimentais resultaram em valores significativamente menores que o grupo controle. Comparando o tipo de solda, o teste de Tukey mostrou que a solda TIG resultou em tensão máxima de flexão significativamente maior que a solda Laser (p< 0,05), independente do tipo de junção. Para o fator área soldada as junções com desenho em “X” resultaram em valores significativamente maiores que a junção “I” para ambos os processos de soldagem. Na comparação das áreas soldadas, entre os dois processos de soldagem, o processo TIG resultou em valores significativamente maiores de área soldada quando empregado o tipo de junção “I” e significativamente menores para o tipo X30° (p<0,05). Para o tipo de junção X45° não houve diferença estatística (p>0,05). A correlação de Pearson entre as variáveis área soldada e tensão máxima de flexão mostrou-se moderada (0.5520) e significativa (p<0.0001). As imagens obtidas por meio de MEV mostraram maior presença de poros nas superfícies de fratura soldadas à Laser e aspectos sugerindo presença de ductibilidade nas superfícies soldadas a TIG. Foi possível concluir que o emprego da soldagem TIG e do desenho de junção em “X” resultam em maiores valores de resistência flexural, sendo estas mais indicadas para soldagem de barras de liga de Ti-6Al-4V de 3,18mm de diâmetro, quando altos valores de resistência flexural são requeridos.

**Palavras Chave:** Resistência à flexão, Solda Laser, Solda TIG, Titânio.



The aim of this study was to evaluate the effect of different drawings of joints and welding processes Tungsten Inert Gas (TIG) and Laser in flexural bar alloy Ti-6Al-4V. Seventy specimens with dimensions of 3.18mm diameter and 40mm length were divided into seven groups (n = 10): C, control group (intact); groups TI, TX30° and TX45° with joint beveled at 0°, 30° and 45° respectively, TIG welded; and Groups LI, LX30° and LX45° with joint beveled at 0°, 30° and 45° respectively, Laser welded. After the mechanical test, the values bending fracture strength (N) were converted to maximum bending stress (MPa) and the fracture surfaces were measured to obtain the soldered areas. Data were initially subjected to Factorial ANOVA (2 x 3) followed by Tukey test. Then, only the data of maximum bending stress were analyzed with Analysis of Variance for single factor followed by Dunnett's test to detect differences between the control group and six experimental groups. Was applied the Pearson correlation to the factors type of weld and joint type. For all tests were considered statistical differences for  $\alpha=0.05$ . Dunnett's test showed that the groups TX30° (p=0.990) and TX45° (p=0.995) resulted in values of maximum tension bending similar to the control group. The other experimental groups resulted in significantly lower values than the control group. Comparing the type of solder, the Tukey test showed that the TIG welding resulted in maximum flexion significantly greater than the Laser weld (p<0.05), regardless of the type of junction. For the factor welded joints area with drawing "X" resulted in significantly higher values than the junction "I" for both welding processes. In comparing the welded areas between the two processes of welding, TIG process resulted in significantly higher values of welded area employed when the junction type "I" and significantly lower for the type X30° (p<0.05). For the type of junction X45° no statistical difference (p>0.05). The Pearson correlation between variables welded area and maximum bending stress was moderate (0.5520) and significant (p<0.0001). The images obtained by SEM showed increased presence of pores on the fracture surfaces and Laser welded aspects suggesting the presence of ductility TIG welded surfaces. It was concluded that the use of TIG welding and drawing joint "X" resulting in higher flexural strength, which are more suitable for welding bars alloy Ti-6Al-4V 3.18mm in diameter when high values of flexural strength are required.

**Keywords:** Flexural, Laser Welding, TIG Welding, Titanium.

## **1- INTRODUÇÃO**

O conhecimento e domínio dos processos de soldagem são de suma importância para obter resultados previsíveis e duráveis na confecção de infraestruturas protéticas (Byrne, 2011). Tais processos são frequentemente empregados para compensar deficiências oriundas do processo de fundição, gerando estruturas com menores distorções, melhor adaptação e distribuição mais uniforme das forças (Chai & Chou, 1998; Tiozzi et al., 2008; Simamoto-Júnior et al., 2008; da Silveira Júnior et al., 2009; Tiozzi et al., 2010; Byrne, 2011).

A soldagem convencional ou Brasagem tem sido aplicada há vários anos, devido ao baixo custo e relativa efetividade (AWS, 1992). Entretanto, problemas como oxidação das faces unidas pela solda, porosidade e superaquecimento na junção durante o processo podem promover pequenos defeitos estruturais e posteriormente, causar o fracasso do tratamento reabilitador (Tehini & Stein, 1993; Silva, 2007). Com o crescente uso do titânio (Ti) e suas ligas na odontologia, houve a necessidade de incorporação de novas técnicas de soldagem. Os processos de soldagem TIG, Plasma e Laser (Hart & Wilson, 2006; Simamoto-Júnior et al., 2008; Silva et al., 2012) se destacaram como opções para união de segmentos de infraestruturas protéticas de Ti e suas ligas, por disponibilizarem sistema de proteção com gás inerte, geralmente o argônio, sem o qual ocorre contaminação da junção por gases ambientes, tornando-a mais frágil (Yamagishi et al., 1993; Liu et al., 2002; Takayama et al., 2012).

Embora estudos tenham demonstrado que o emprego dos processos de soldagem pode melhorar a adaptação das infraestruturas (Chai & Chou, 1998; Tiozzi et al., 2008; Simamoto-Júnior et al., 2008; da Silveira Júnior et al., 2009; Tiozzi et al., 2010; Byrne, 2011), algumas limitações devem ser consideradas tais como a formação de poros, trincas e vazios internos decorrentes de penetração incompleta, que acabam afetando a resistência das infraestruturas soldadas (Tehini & Stein, 1993; Nuñez-Pantoja et al., 2011a). A penetração da solda é um dos principais fatores que afetam a resistência mecânica das junções soldadas (Baba & Watanabe, 2005). Estudos têm demonstrado que quando se realiza soldagem com as extremidades posicionadas em justaposição, a penetração da solda pode ficar prejudicada, diminuindo a resistência da junção (Nuñez-Pantoja et al., 2011b; Pantoja et al., 2012). No sentido de superar esta limitação, foram propostas variações no desenho das junções (Bertrand & Poulon-Quintin, 2010). A utilização do chanfro em “X” tem como finalidade maior penetração do material de



adição e assim conferir maior resistência à junção (Zupancic et. al., 2006; Silva, 2007, Shimakura et al., 2009; Nuñez-Pantoja et al., 2011a; 2011b, Pantoja et al., 2012).

O sucesso em longo prazo das reabilitações protéticas fixas está diretamente relacionado com a capacidade de resistência das junções soldadas (Chaves et al., 1998; Bertrand & Poulon-Quintin, 2010; Byrne, 2011). Sendo assim, fica evidente a necessidade de se buscar por meio de ensaios experimentais, as melhores alternativas para obtenção de junções, se não ideais, as mais adequadas possíveis, de tal maneira a minimizar a ocorrência de falhas prematuras. Além disso, ao se conhecer melhor as variáveis envolvidas no processo, torna-se possível estabelecer os parâmetros adequados para obtenção de junções eficientes e duráveis, possibilitando a difusão adequada da técnica, tanto para acadêmicos quanto para profissionais que fazem uso rotineiro da mesma.

Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito do desenho das junções e tipo de solda, em barras de liga de Ti-6Al-4V, por meio de ensaio mecânico de flexão. Três hipóteses foram testadas: (I) a utilização da junção com desenho em “X” resultaria maior resistência flexural; (II) os processos de soldagem TIG e Laser alcançariam valores de resistência similares para os diferentes desenhos de junção avaliados; (III) angulações diferentes nas junções com desenho em “X” resultariam em diferentes valores de resistência flexural.

## **2- REVISÃO DA LITERATURA**

## 2.1- Soldagem à Laser

Os primeiros estudos com solda Laser voltados para a prótese odontológica foram publicados por Gordon & Smith, em 1970. Os autores descrevem abordagens básicas, experiências e vantagens da soldagem à Laser de próteses fixas parciais e próteses parciais removíveis de precisão. Nesse estudo, os pesquisadores variaram os níveis de energia entre 6 e 12J e pulso de 4 e 8ms 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 fusão do metal, sem produção de concavidades. Em seguida, foram realizados testes em coroas de molares fundidas em ouro tipo III, obtendo soldagem satisfatória. Os autores concluíram que a solda Laser se apresenta como uma nova técnica para união de metais de forma rápida, econômica e precisa. Além disso, encontraram as seguintes vantagens na utilização da solda Laser: soldagem no próprio modelo de trabalho; menor distorção na peça e menor tempo de trabalho; força de união da solda compatível com o metal de origem; preservação da anatomia da infraestrutura metálica e ausência de dano à resina ou porcelana próxima à área de soldagem.

Sjögren et al. (1988) utilizaram barras de Ti soldadas à Laser submetidas aos testes de resistência a tração. As amostras foram confeccionadas com 2 e 5mm de diâmetro e 70mm de comprimento. Foram confeccionadas 56 barras, sendo 16 para o grupo controle (8 de cada diâmetro); das restantes, 8 barras de 2mm e 32 barras de 5mm de diâmetro foram seccionadas ao meio e unidas por meio de soldagem à Laser, sob atmosfera protetora de gás argônio. Os parâmetros de soldagem para as amostras de 2.0mm de diâmetro foram: 15J, 5ms e 10Hz; para as amostras de 5.0mm 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-** 12J / 6 ms / 10Hz; **B-** 18J / 6 ms / 10Hz; **C-** 18 J / 6ms / 5Hz e **D-** 30 J / 10ms / 3Hz. Para comparação, foram confeccionadas 8 amostras fundidas em ouro tipo III, de 5.0mm de diâmetro, soldadas por Brazagem e submetidas aos mesmos ensaios realizados nas amostras de Ti. Os resultados mostraram que o parâmetro de soldagem utilizado nas amostras de 2.0mm e os parâmetros **A** e **B**, nas amostras de 5.0mm foram os mais adequados com relação à resistência e profundidade de penetração da solda obtida. O mecanismo de fratura das amostras não soldadas foi

similar aos espécimes soldados, com presença de fratura dúctil, com rachaduras e poros na superfície de fratura em níveis variados de acordo com os parâmetros utilizados.

Yamagishi et al. (1993) avaliaram a resistência flexural de placas de Ti laminado e placas de Ti fundido, soldadas à Laser. Os espécimes que apresentavam dimensões de 30 X 5 X 1mm, foram seccionados ao meio e soldados com diferentes parâmetros, com e sem proteção de gás argônio. Os parâmetros testados foram intensidade da corrente (J / P), taxa de sobreposição e duração do pulso, conforme o destino a que cada amostra teria frente aos testes de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), teste de flexão e teste de dureza Vickers. Os autores concluíram que há uma relação significativa entre tensão de flexão e a atmosfera de proteção, a intensidade do Laser e a combinação de atmosfera e intensidade e ainda que, a solda à Laser é eficaz quando realizada sob proteção de gás argônio.

Berg et al. (1995) avaliaram amostras de Ti cp (fundido e pré-fabricado) soldadas à Laser, comparados com amostras de liga de ouro fundidas (tipo IV) soldadas por Brazagem, por meio de teste de resistência a tração. Foram confeccionadas 39 amostras (2.5 X 32mm) distribuídas em 3 grupos (n=13). As amostras foram seccionadas ao meio, fixadas em um dispositivo de padronização e soldadas à Laser para os espécimes de Ti (topo a topo) e por meio de Brasagem com material de adição para as amostras fundidas em ouro (0.5mm de espaçamento). Os autores relataram dificuldades relacionadas a fundição e soldagem do Ti devido ao alto ponto de fusão, afinidade química por gases ambientes e dificuldade de escoamento relacionado ao baixo peso específico do Ti. Os resultados mostraram que o Ti fundido, o Ti pré-fabricado e o ouro soldado por Brazagem apresentaram valores de resistência à tração menor que a liga de ouro intacta (entre 25 e 58%). Não houve diferença significativa entre os valores obtidos para o Ti fundido e pré-fabricado. Padrões similares de escoamento foram observados. A ductibilidade das amostras intactas de Ti pré-fabricado foi duas vezes maior do que as amostras intactas de liga de ouro e de Ti fundido e todas as amostras soldadas apresentaram ductibilidade menor que as amostras intactas, embora algumas dessas diferenças não fossem estatisticamente significantes. As imagens de MEV obtidas das superfícies de fratura indicavam variação no comportamento das amostras para a ductibilidade, com presença de bolhas e poros. Os tipos de fratura mais comum foram as frágeis e segundo os autores, a fratura provavelmente ocorreu nas regiões das bolhas e poros.

Chai & Chou (1998) avaliaram por meio de ensaio de resistência à tração, escoamento a 0,2% e porcentagem de alongamento, as propriedades mecânicas do Ti cp soldado à Laser sob diferentes condições. O estudo buscou determinar os parâmetros ideais de soldagem em relação à duração do pulso (tempo) e voltagem. Foram confeccionados 57 corpos de prova em forma de algar (norma ISO 6871) em Ti cp e divididos em 09 grupos experimentais e um controle. Os espécimes foram soldados à Laser sob diferentes parâmetros quanto ao tempo e voltagem (8, 10, 12ms X 290, 300, 310V). Houve diferença significativa entre os grupos soldados com 290V e os grupos de 300 e 310V para o parâmetro resistência à tração dentro do fator voltagem; não houve diferença estatística para o fator pulso 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. O grupo controle obteve maiores médias dos valores de porcentagem de alongamento do que as médias dos grupos experimentais. Os testes estatísticos mostraram que para o parâmetro alongamento não houve interação entre voltagem e pulso, sendo também a voltagem o único fator significativo para esse parâmetro. A análise fractográfica da superfície de fratura do grupo controle mostrou que 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 (*dimples*) mais discretas.

Liu et al. (2002) utilizaram amostras de Ti cp soldadas à Laser com níveis de potência variando de 180 a 300A, com incrementos de 30 A. Amostras de Ti (0.5 x 3.0 x 40mm e 1.0 x 3.0 x 40mm) foram seccionadas ao meio para formarem os grupos experimentais, enquanto as amostras do grupo controle foram mantidas intactas. O ensaio de resistência à tração foi realizado com velocidade de 2mm/min, com o valor registrado em N no momento da fratura da amostra. Foram feitas imagens por meio de MEV (32X) correlacionando o tipo de fratura com o valor da força de resistência à tração. Os autores concluíram que os valores da força de união das amostras soldadas frente ao teste de tração são similares aos valores obtidas para as amostras intactas, quando condições ideais são utilizadas no processo de soldagem. A utilização do diâmetro do ponto de solda entre 0.4 e 1.0mm e duração do pulso de 10ms, foi mais eficiente para o parâmetro penetração da solda. As imagens obtidas por meio de MEV mostraram a presença de bolhas e poros nas regiões soldadas à Laser. Para os grupos

controles as imagens evidenciaram presença de *dimples*, em função de sua maior ductibilidade.

Zavanelli et al. (2004) utilizaram amostras reparadas de Ti cp e liga de Ti-6Al-4V soldadas à Laser em teste de resistência à fadiga e corrosão, sob diferentes condições de armazenamento. Foram confeccionadas 33 amostras de cada metal, em forma de algar (2.3 x 40mm), sendo as amostras divididas em três grupos: amostras imersas em solução de saliva artificial; amostras imersas em solução de saliva artificial fluoretada e amostras sem imersão. As amostras foram reposicionadas após a fratura e novamente unidas por meio de soldagem à Laser e submetidas a novo ensaio de fadiga nas mesmas condições, até a fratura. As superfícies das fraturas foram observadas em MEV e foi comparado o número de ciclos entre as amostras intactas e soldadas. Os resultados mostraram que houve diferença significativa entre amostras intactas (11060 ciclos) e soldadas (6145 ciclos); houve diferença significativa entre as amostras ensaiadas sem imersão (“ar”) e as imersas em soluções de saliva artificial, entretanto, não houve diferença entre a solução sem flúor e a solução com flúor (16186, 5674 e 3948 respectivamente). As imagens de MEV evidenciaram defeitos internos na solda, sugerindo penetração inadequada do Laser. A resistência à corrosão do titânio depende da estabilidade da camada superficial de óxido, sendo que a presença de íons flúor interfere nesta proteção. Os autores concluíram que o número de ciclos necessários para a fratura diminuiu em ambientes úmidos e o processo de reparação à Laser afetou negativamente a resistência de ambos os metais sob condições de corrosão e fadiga.

Baba & Watanabe (2005) avaliaram os efeitos das condições de soldagem à Laser relativos à tensão (V) e diâmetro do ponto de solda (mm) sobre a profundidade de penetração em Ti cp e em ligas de Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb, Co-Cr e ouro tipo IV. Dois blocos de cada metal fundido foram posicionados uns contra os outros e foram soldados na sua interface com as seguintes condições: voltagem variando de 160 a 340V, diâmetro do ponto variando de 0,4 a 1.6mm, e duração de pulso de 10ms. Após a soldagem à Laser, os blocos foram separados, e a profundidade de penetração em cada liga foi medida. A profundidade de penetração alcançada para cada tipo de metal foram as seguintes: Ti cp (0,29 a 6,45mm), Ti-6Al-4V (0,32 a 5,24mm), Ti-6Al-7Nb (0,34 a 5,65mm), Co-Cr (0,24 a 6,15mm), e para a liga de ouro tipo IV (0,12 a 5,22mm). Segundo os autores a tensão e o diâmetro do ponto de solda afetaram a profundidade de penetração nos metais testados. O aumento da tensão e a redução do diâmetro do ponto

resultaram em um aumento da profundidade de penetração da solda para cada metal testado. Também relataram que a profundidade de penetração é um dos principais fatores que afetam a força de uniões soldadas à Laser, pois quanto maior a profundidade de penetração, maior a área de solda. A seleção adequada das condições de soldagem à Laser para se obter profundidade de penetração suficiente para uma determinada espessura de um metal é um importante fator na soldagem de próteses. A profundidade de penetração do processo Laser, utilizando o mesmo nível de energia, varia na dependência das propriedades de cada metal utilizado, em função de sua condutibilidade térmica e taxa de absorção do feixe de Laser.

Botega (2005) avaliou a resistência à tração e alongamento de amostras fundidas em Ti cp com diferentes diâmetros (1.5, 2.0 e 5.0mm) e soldadas à Laser com variações nos *gaps* (0.0mm e 0.6mm). Foram confeccionadas 45 amostras, divididas em 9 grupos (n= 5) de acordo com as combinações de diâmetro e *gap*. Após a fundição, as amostras dos grupos experimentais foram seccionadas ao meio, unidas com resina acrílica autopolimerizável e soldadas com as seguintes especificações: 320V / 9ms para amostra de 1.5mm, 330V / 9ms para amostra de 2.0mm e 350V / 9ms para amostra de 5.0mm. Após a soldagem, foram então submetidas ao teste de resistência à tração com velocidade de 1mm / min até a ruptura. Os valores médios de resistência máxima à tração (MPa) mostraram que o grupo controle (íntacto) apresentou valores estatisticamente superiores aos grupos experimentais em cada um dos diâmetros avaliados. Os grupos experimentais não diferiram entre si, exceto para o grupo de 5.0mm de diâmetro, onde a distância de 0.6mm resultou em maiores valores de resistência à tração. Os valores médios de alongamento para o grupo controle foram estatisticamente superiores aos experimentais nos diâmetros 2.0 e 5.0mm, não havendo diferença entre os grupos com diâmetro de 1,5mm. Não houve diferença estatística entre os grupos experimentais para cada diâmetro utilizado. As imagens revelaram eficiente penetração do Laser nas amostras de 1.5 e 2.0mm de diâmetro, e insuficiente nas de 5.0mm de diâmetro. A resistência à tração para todos os diâmetros e o alongamento para os diâmetros 2.0 e 5.0mm foram influenciados significativamente pela técnica de soldagem à Laser. Dentre as amostras de 5.0mm de diâmetro, aquelas com distância de 0.6mm permitiram maior penetração do feixe de Laser.

Watanabe & Topham (2006) avaliaram o efeito da proteção do gás argônio em amostras fundidas de Ti cp e em ligas fundidas de Ti-6Al-7Nb, Co-Cr e liga de ouro. As

amostras dos diversos metais foram preparadas a partir da fundição de placas com dimensões de 0.5 x 3.0 x 10mm. O grupo controle foi mantido intacto nas dimensões de 0.5 x 3.0 x 20mm. As amostras fundidas e polidas foram posicionadas topo a topo para a soldagem à Laser, com pulso de 10ms, diâmetro do ponto de solda de 1mm e 200V. Os corpos de prova para cada grupo experimental (n=5) receberam 3 ou 5 pontos de solda em cada lado, com ou sem proteção de gás argônio. Foi empregado o ensaio de resistência à tração com velocidade de 1.0mm / min com registro dos valores de resistência e alongamento. A proteção de argônio resultou em significativo aumento na resistência à tração e no alongamento de amostras soldadas à Laser. Os grupos do Ti cp e da liga de Ti-6Al-7Nb com proteção de argônio e cinco pontos de solda exibiram o maiores valores de resistência à tração, equivalentes aos do grupo controle correspondente. Os valores de resistência à fratura obtida pelas amostras de liga de ouro equivaleram aproximadamente à metade dos valores obtidos pelo grupo controle, tanto para as amostras com e sem proteção de gás argônio. As amostras de Co-Cr apresentaram maiores valores de resistência à tração nos corpos de prova soldados sem proteção de gás inerte. Houve uma correlação positiva entre o alongamento e os valores de resistência à tração. Os autores concluíram que, para o Ti cp e para liga de Ti-6Al-7Nb, a proteção de gás argônio é indispensável para se obter soldagem à Laser adequada, mas para as ligas de ouro e Co-Cr esta proteção não é necessária.

Lin et al. (2007) avaliaram a resistência flexural de placas fundidas de Ti cp grau 2 (30 X 5mm) e diferentes espessuras (1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0mm). As amostras foram seccionadas ao meio, posicionadas justapostas e soldadas à Laser em atmosfera de gás inerte. Houve variação na voltagem (310, 320, 340, 360 e 400V), correspondendo a 11, 13, 15, 18 e 24J, respectivamente. As amostras soldadas foram avaliadas radiograficamente e as imagens mostraram ausência de bolhas e porosidades. Para o teste de flexão de quatro pontos foi utilizada máquina universal de teste com velocidade de 0,5mm/min. Os resultados mostraram que a diminuição da espessura dos espécimes e / ou aumento da energia de soldagem, aumentou a porcentagem de área soldada, o que resultou em um aumento da resistência à fratura. Todas as amostras com 3mm de diâmetro fraturaram na região de solda e as amostras de 1mm foram resistentes à fratura, alcançando 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 os autores concluíram que a



resistência à fratura de placas fundidas de Ti cp soldadas à Laser foi significativamente dependente da espessura da amostra e da energia de soldagem empregada.

Srimaneepong et al. (2008) avaliaram a força de torção, ductilidade e comportamento de fratura de amostras fundidas em liga de Ti-6Al-7Nb comparadas com amostras de Ti cp e liga de Co-Cr, soldadas à Laser com dois diferentes parâmetros de soldagem (220V ou 260V). Para cada liga metálica foram fundidos quarenta e cinco corpos de prova em forma de alteres (n=5) e radiografados para detecção de bolhas e porosidades internas. Os espécimes dos grupos experimentais foram seccionados ao meio, soldados e submetidos ao teste de torção. As superfícies da fratura de todos os espécimes fraturados, inclusive dos grupos controle, foram observadas por meio de MEV. As imagens mostraram que os grupos controle (intactos) e aqueles soldados utilizando liga de Ti-6Al-7Nb e Ti cp apresentaram imagens características de ductibilidade enquanto as amostras soldadas utilizando liga de Co-Cr apresentaram imagens mais planas características de fraturas frágeis. Nenhum dos grupos soldados à Laser utilizando liga de Ti-6Al-7Nb e Ti cp fraturou na região da junção. A força máxima de torção destes grupos foi equivalente àquela obtida pelos grupos controles. De modo diferente, os espécimes dos grupos soldados à Laser composto de liga de Co-Cr exibiram fratura frágil e menores valores de força máxima de tensão de torção. Os autores concluíram que a resistência mecânica da liga fundida de Ti-6Al-7Nb soldada à Laser é suficiente para aplicações clínicas.

Núñez-Pantoja et al. (2011c) avaliaram a resistência à fadiga de junções de Ti cp soldadas à Laser. Foram torneadas noventa barras em forma de alteres com diâmetro central de 1,5; 2,0 e 3,5mm. Sessenta barras foram seccionadas ao meio e soldadas com diferentes espaçamentos de abertura: 0,0 e 0,6mm. As barras seccionadas foram divididas em seis grupos, que somadas aos grupos controle (intactos) perfizeram um total de 9 grupos (n=10). A soldagem foi executada usando 360V / 8ms (1,5 e 2,0mm) e 380V / 9ms (3,5mm) e em seguida as barras foram radiografadas (90kv, 15mA, 0,6s e de 10 a 13mm de distância) para verificar a presença de porosidade (PP). As amostras foram submetidas a testes cíclicos até a fratura e o número de ciclos (NC) foi registrado. As superfícies fraturadas foram avaliadas por meio de MEV. O NC foi menor para todas as amostras soldadas com espaçamento de 0,6mm e para as amostras de 3,5mm de diâmetro com espaçamento de 0,0mm. Uma correlação negativa entre NC e PP foi encontrada (Coeficiente de Spearman). Os autores concluíram que as melhores condições para a soldagem de junções de Ti cp envolvem a justaposição das peças,

exceto para os diâmetros maiores, onde ambas as variações na abertura da junção promoveu articulações menos resistentes à ciclagem mecânica. Quanto ao exame radiográfico, este deve ser realizado antes da aprovação da soldagem, para evitar a instalação de infraestruturas de próteses frágeis.

Takayama et al. (2012) avaliaram os efeitos da taxa de fluxo de gás argônio sobre a resistência e porosidade em junções soldadas à Laser em placas fundidas em Ti e liga de Co-Cr. As placas de cada metal foram aproximadas e soldadas com fluxo de gás argônio de 0 (zero), 5 e 10L / min para a liga de Co-Cr e 5 e 10L / min para o Ti. Após a soldagem os espécimes foram submetidos ao teste não destrutivo para avaliação de poros internos por meio de microtomografia. Após o teste de tração, foi feita avaliação da superfície com sonda eletrônica de microanálise com raios-X e teste de microdureza Vickers. Houve uma diferença significativa na proporção de porosidade de acordo com a taxa de fluxo de gás argônio na área soldada. Imagens em 3D das áreas soldadas dos espécimes mostrou que a porosidade ocorreu próximo ao centro da área soldada em liga de Co-Cr, mas ficou distribuída por toda a área quando soldada em Ti. Solda à Laser da liga de Co-Cr foi muito pouco influenciada pela blindagem de argônio. Em contraste, para o Ti, a resistência conjunta dos espécimes soldados foi afetada pela taxa do fluxo de argônio. Os resultados sugerem que existe uma possibilidade de que a força de soldadura seja reduzida com um fluxo excessivo, embora esta taxa do fluxo tenha impedido a oxidação.

## **2.2- Soldagem TIG**

Roggensack et al. (1993) avaliaram a viabilidade das técnicas de soldagem Laser e Plasma em amostras de Ti cp. Os espécimes soldados à Laser foram fixados com contato topo-a-topo, enquanto os espécimes do grupo Plasma foram mantidos com um *gap* de 500µm e soldados com metal de adição, sendo então submetidos aos ensaios de dureza Vicker's e fadiga. A avaliação microestrutural foi feita por meio de MEV e os perfis de dureza foram registrados para verificar a influência do processo de soldagem na estrutura metálica. O ensaio de fadiga seguiu o método de Wöhler, onde as amostras são inicialmente submetidas à altas cargas de tensão, com o objetivo de causar fratura após poucos ciclos. Subsequentemente, o experimento foi repetido com tensões cada vez mais baixas até que a fratura não ocorresse, determinando desta maneira a carga de tensão que pode ser aplicada sem que ocorra a fratura das amostras. As imagens de

MEV mostraram que, nas amostras soldadas à Laser, a junção não se apresentava completamente soldada, com uma penetração da solda em torno de 0,7mm. As alterações observadas na estrutura do metal soldado à Laser se limitaram à zona soldada. Já as amostras soldadas por meio de Plasma exibiram maior ZAC, com dimensões acima de 3mm, entretanto, não foi observado presença de poros ou trincas no cordão de solda. Para ambos os processos, a dureza do metal aumentou significativamente na região da solda. O ensaio de fadiga obteve resultados com cerca de 40% de redução na resistência do material soldado, quando comparado ao grupo controle. Os autores justificaram a diferença encontrada nas propriedades das amostras de cada procedimento de soldagem como sendo decorrente da duração de cada processo: o processo da solda por Plasma, aplicado de maneira longa e contínua, gera maior ZAC; já a solda à Laser, pulsada e concentrada em um pequeno ponto, gera uma menor ZAC. O aumento da dureza teria ocorrido segundo os autores, em decorrência da incorporação de impurezas durante a soldagem e devido ao processo de resfriamento do Ti. Os dois processos apresentaram resultados adequados para a união do Ti em procedimentos odontológicos.

Wang & Welsch (1995) analisaram amostras de Ti cp e de liga de Ti-6Al-4V soldadas por meio de três processos distintos: Laser, TIG, e solda por Brasagem com Radiação Infravermelha. Foram avaliadas a qualidade, características metalúrgicas e propriedades mecânicas das junções, por meio de ensaios mecânicos de resistência à tração, dureza Vicker's, e alongamento. Segmentos cilíndricos usinados (3 X 40mm) em Ti cp e liga de Ti-6Al-4V foram soldados por meio dos diferentes processos obtendo 8 amostras para cada grupo experimental (3 X 80mm), sendo 3 grupos formados para cada tipo de metal utilizado. Oito barras de Ti cp e oito de liga de Ti-6Al-4V intactas (3 X 80mm) foram utilizadas como controle. A soldagem à Laser foi realizada com parâmetros equivalentes a 18J de energia, pulso de 12ms e frequência de 2Hz. Para a soldagem TIG os parâmetros utilizados foram correspondentes a 10A e de 3s. A Brasagem com Radiação Infravermelha foi realizada com corrente de 15A e 3s 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 pelo equipamento. As superfícies fraturadas foram examinadas por meio de fractografia e MEV. A resistência à tração das amostras de liga de Ti-6Al-4V foi significativamente

maior que as obtidas pelas amostras de Ti cp, independentemente do processo de soldagem utilizado. Todas as amostras soldadas foram significativamente menos resistentes que as barras intactas; o grupo controle para o Ti cp obteve a maior média de resistência à tração, seguido pelo de solda TIG, solda Laser e Brasagem com Radiação Infravermelha. Na avaliação do alongamento, o grupo controle de Ti cp obteve a maior média e o grupo da Brasagem com Radiação Infravermelha obteve os menores valores. Os valores de microdureza foram significativamente maiores na ZAC, para ambos os metais utilizados e em todos três tipos de soldagem testadas. Os autores atribuem este achado às mudanças que ocorrem na microestrutura e à absorção e difusão de oxigênio na camada superficial aquecida. O tamanho do grão na ZAC das amostras de solda à Laser foi muito menor do que o encontrado na solda TIG e Brasagem com Radiação Infravermelha, conforme demonstrado por meio da análise fractográfica das superfícies de fratura. Isso ocorre como resultado do pouco tempo de intervalo que o material é submetido às altas temperaturas quando soldadas à Laser. As imagens obtidas por meio de MEV indicaram a ocorrência de falha coesiva em todas as amostras de Brasagem com Radiação infravermelha. Algum grau de ductilidade foi observado na superfície de fratura das amostras de solda TIG e a maior parte da seção transversal de todas as junções soldadas à Laser não foi unida.

Neo et al. (1996) avaliaram as propriedades mecânicas do Ti cp grau II soldado à Laser e TIG, comparado com o metal original intacto, antes e após o tratamento térmico. Amostras de Ti cp em forma de alteres (3 X 18mm) foram divididas em 3 grupos: G1- controle sem solda; G2- solda à Laser, e G3- solda TIG. Em cada grupo, metades das amostras foram submetidas ao tratamento térmico simulando a aplicação de porcelana. Realizou-se ensaio de resistência à tração com velocidade de 1mm / min, para obtenção da resistência à tração, resistência ao escoamento a 0,1%, módulo de elasticidade e porcentagem de alongamento. As amostras soldadas por ambos os processos apresentaram valores de resistência à tração maior que o grupo controle. Porém, quando submetidas ao tratamento térmico, os valores diminuíram; comportamento semelhante foi observado para a resistência ao escoamento a 0,1%, e módulo de elasticidade. Os resultados de porcentagem de alongamento das amostras soldadas, com ou sem tratamento térmico, foram significativamente inferiores aos valores obtidos pelo grupo controle. Os autores relataram que o tratamento térmico causou diminuição da flexibilidade. Houve formação de estruturas  $\alpha$ -martensíticas,

conhecidas pela maior resistência à tração, resistência ao escoamento e dureza quando se utilizou a solda à Laser, em decorrência da alta velocidade de esfriamento associada à baixa voltagem utilizada neste processo. Entretanto, esta estrutura apresenta baixa ductibilidade, conforme é notado pelos menores valores de porcentagem de alongamento. No caso das amostras soldadas a TIG, a lenta velocidade de esfriamento causou a formação de estruturas  $\alpha$ -*widmanstätten*, que apresentam melhor resistência à tração e ao escoamento que o Ti intacto e maior ductibilidade que a estrutura martensítica. Os autores concluíram que as propriedades mecânicas do Ti soldado por ambas as técnicas foram semelhantes às aquelas demonstradas pelo grupo controle intacto.

Taylor et al. (1998), avaliaram a resistência à tração e o alongamento em amostras de liga de Ti-6Al-4V fundidas em formato de algarismos e soldadas pelo processo TIG. Quatro diferentes *gaps* (0,25; 0,50; 0,75 e 1,00mm) foram utilizados e ensaiados em máquina com velocidade de 0,05cm / min. As amostras fraturadas foram analisadas por meio de MEV. Não houve diferença estatística significativa entre os grupos para a tensão máxima de tração e para o alongamento. As amostras soldadas fraturadas observadas em MEV demonstraram um comportamento mais frágil com uma superfície relativamente mais plana.

Hart & Wilson (2006) avaliaram a resistência de soldas em junção de cantiléver de estruturas implanto-suportadas de Ti, submetidas à carga funcional simulada, por meio de ensaios mecânicos de tensão flexural e fadiga. Foram fabricadas sessenta estruturas com cantilevers de 12mm, as quais foram divididas em 4 grupos (n=15). Três grupos utilizaram solda à Laser com 0; 1 e 2 passos com material de adição (fio de Ti para solda). No quarto grupo, as junções foram soldadas por um processo padrão de soldagem TIG, também utilizando material de adição. O volume do metal de adição utilizado (média de 0; 1,7; 3,4 e 8,3mm<sup>3</sup> respectivamente) foi determinado por meio da medição do comprimento do fio metálico, antes e após a soldagem em cada junção. Dez estruturas de cada grupo foram testadas em ensaio mecânico flexural, com carga no cantiléver a uma distância de 10mm a partir do pilar. As cinco estruturas restantes foram testadas por meio de simulação de carga mastigatória de 200N até a falha ou a um máximo de 1 milhão de ciclos. A análise estatística dos dados demonstrou que houve diferenças significativas entre os quatro grupos para resistência à flexão máxima ( $p<0,001$ ) e resistência a cargas cíclicas ( $p=0,002$ ). O volume de fio de adição utilizado foi um indicador prévio significativo da força flexural final ( $p=0,03$ ), e era um determinante do número de ciclos até à falha limítrofe em 200N ( $p=0,05$ ). Cada passe

de solda à Laser com metal de adição praticamente dobrou a resistência máxima à flexão e resistência à fadiga em relação ao procedimento de solda anterior. Soldagem TIG com proteção eficiente de argônio para o metal de adição produziu as articulações mais fortes e resistentes. Todas as junções soldadas à Laser falharam com fratura frágil na região de união da solda nos dois testes enquanto a solda TIG falhou apenas nos ensaios de flexão, apresentando deformação plástica na junção, sem fratura.

Rocha et al. (2006) utilizaram barras Ti cp e ligas de Ni-Cr e Co-Cr soldadas pelos processos TIG e Laser (Nd:YAG), para avaliar resistência à flexão das amostras em função do tipo de solda utilizada. 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) contendo 5 amostras de cada metal. I: soldagem à Laser; II: soldagem à Laser usando metal de adição; III: soldagem com TIG; IV (controle): sem soldagem (corpos de prova intactos). Houve diferença estatisticamente significante entre o metal e as ligas íntegras ( $p < 0,001$ ), sendo a liga do Co-Cr a mais resistente à deflexão, exceto quando soldada à Laser sem adição. Ao se comparar os diferentes processos de soldagem, diferença estatisticamente significante ( $p < 0,001$ ) foi encontrada entre a solda TIG e o Laser e entre este e o Laser mais o material de preenchimento. Conclui-se que a soldagem TIG apresentou melhores resultados que a soldagem Laser para os três materiais testados.

Pantoja et al. (2012) avaliaram a resistência à ciclagem mecânica de estruturas confeccionadas em liga de titânio (Ti-6Al-4V), submetidas a soldagem à Laser e TIG, com variação no desenho da junção. Os dados obtidos por meio do ensaio mecânico foram correlacionados com os dados obtidos na análise radiográfica dos espécimes. Foram confeccionados 70 corpos de prova (halteres) usinados em liga de Ti-6Al-4V, com 3,5mm de diâmetro de secção transversal, divididos em 7 grupos (n=10). Os espécimes foram seccionados ao meio e alinhados, segundo os desenhos da união: em “I”, variando as distâncias de soldagem em 0,0mm (I00) ou 0,6mm (I06), ou em “X” (X). O desenho que obteve maior resistência, com maior número de ciclos até a fratura foi o “X”, para ambos os procedimentos de soldagem. Para o procedimento Laser, I06 foi tão resistente quanto o desenho “X”. Nos desenhos I00 e I06, as junções soldadas à Laser foram mais resistentes do que TIG. A correlação de Spearman indicou uma correlação negativa entre o número de ciclos e a presença de porosidade ( $\alpha = 0,05$ ). Os autores concluíram que o desenho “X” deve ser empregado quando se pretende soldar

estruturas de 3,5mm de diâmetro de secção transversal pelo processo TIG. Já para a solda à Laser, pode ser utilizado o desenho em “I” com 0,6mm de espaçamento entre as partes, bem como o desenho “X”.

Silva et al. (2012) avaliaram o efeito de diferentes parâmetros de solda Plasma (PL) verificando a resistência flexural de barras de liga de titânio (Ti-6Al-4V). Quarenta espécimes de Ti-6AL-4V e dez espécimes de liga de Ni-Cr foram preparados (40 X 3,18mm) e divididos em 5 grupos (n=10). As barras de liga titânio do grupo controle não foram seccionadas e nem submetidas a processo de soldagem. Os grupos PL10, PL12 e PL14, continham barras de Ti seccionadas e soldadas com uma corrente de 3A por períodos de 10, 12 e 14ms, respectivamente. O grupo constituído de barras de liga de Ni-Cr foram soldados pelo processo de Brasagem convencional. Em seguida as barras foram submetidas ao teste de flexão de três pontos e os valores obtidos em N foram convertidos em resistência flexural (MPa). Diferença estatística foi verificada entre os grupos avaliados, com os maiores valores para o grupo controle. Não foram encontradas diferenças entre os grupos de solda Plasma. O grupo Ni-Cr apresentou os menores valores de resistência flexural embora tenha sido estatisticamente semelhante ao grupo PL14. Não houve diferença significativa na profundidade de penetração entre os grupos de solda Plasma ( $p=0,05$ ). Três espécimes representativos foram aleatoriamente selecionados para serem avaliados por meio de MEV. A composição das regiões soldadas foi verificada por meio de espectroscopia por energia dispersiva. Segundo os autores o estudo forneceu parâmetros iniciais para permitir a utilização de soldagem Plasma durante a fabricação de estruturas em liga de Ti, uma vez que a indústria comercializa este equipamento oferecendo pouco suporte para sua aplicação, ficando os usuários obrigados a desenvolver empiricamente seus próprios processos e parâmetros de configuração.

### **2.3- Métodos não destrutivos para avaliação de processos de soldagem**

Wang & Boyle (1993) utilizaram filmes oclusais expostos aos raios-X (90KV, 25mA e 30s de exposição), a uma distância de 10cm entre cone do aparelho de raios-X e a infraestrutura. A exposição e processamento do filme oclusal foram feitas de maneira usual. Os autores concluíram que com o uso desta técnica simples, o



profissional pode identificar facilmente no interior de uma infraestrutura de Ti, qualquer porosidade que com o passar do tempo poderá provocar uma falha clínica.

Zavanelli & Henriques, em 2001, de maneira semelhante ao estudo de Wang & Boyle (1993) apresentaram um método radiográfico simples para detectar porosidades internas em artefatos protéticos removíveis confeccionados em Ti. Consiste na exposição da estrutura metálica à radiação (90Kv, 15mA, 0,6s e 10 a 13mm de distância), utilizando filme oclusal. Segundo os autores, a execução deste procedimento possibilita a identificação de porosidades na peça que poderiam causar fracasso clínico no futuro. Esse mesmo método pode ser empregado para detectar porosidades presentes em amostras confeccionadas em Ti, para descartar aquelas que apresentem defeitos de fundição.

Núñez et al. (2011) avaliaram a eficácia da técnica radiográfica para inspeção de porosidade em Ti cp fundido com diferentes diâmetros. Sessenta hastes com diâmetro central de 1,5; 2,0 e 3,5mm foram fundidas em forma de halteres. Posteriormente foram avaliadas radiograficamente (90kV, 15mA, 0,6s e 10-13mm de distância), utilizando filme periapical e analisadas visualmente quanto à presença de porosidade, tanto na região central, quanto na extensão do espécime. A maioria dos espécimes apresentaram porosidades interna em sua extensão (91,7%) ( $p=0,0005$ ) e apenas 21,7% destas, ocorreram na parte central das hastes ( $p=0,612$ ). Os autores concluíram que o método radiográfico foi eficiente na visualização de porosidades internas em infraestruturas de Ti fundidas e que estruturas de menor diâmetro são mais susceptíveis a apresentar poros. Sugerem a utilização deste método devido ao baixo custo, rapidez e reprodutibilidade. Além disso, a visualização de falhas internas permite identificar falhas potenciais, possibilitando ao profissional maior controle de qualidade das próteses, o que pode refletir em maior longevidade das mesmas.

Núñez-Pantoja et al. (2011a) avaliaram a influência do desenho das junções soldadas à Laser, variando a abertura da junção e o diâmetro do espécime, em estruturas torneadas em liga de Ti-6Al-4V, quanto à presença de poros, por meio de exames radiográficos. Foram usinadas sessenta hastes em forma de halteres com diâmetros centrais de 1,5; 2,0 e 3,5mm, seccionadas ao meio e soldadas usando duas aberturas (0,0 e 0,6mm). Foram formados seis grupos ( $n=10$ ). A soldagem foi executada usando 360V / 8ms (1,5 e 2,0mm) e 380V / 9 ms (3,5mm), com foco e frequência em zero. Para as aberturas de 0,6mm foi utilizado fio de adição de 0,4mm. As radiografias periapicais



(90Kv, 15mA, 0,6s e 10-13mm de distância) foram visualmente examinadas para verificar qualitativamente a presença de poros nas articulações. O percentual de presença de poros foi calculado sem quantificar os poros por peça soldada. Para as amostras de 1,5mm, a incidência de poros foi significativamente maior quando se utilizou a abertura de 0,6mm (40%) em comparação à abertura de 0,0mm (0%). Para as amostras de 2,0mm, não houve diferença significativa entre os grupos. No entanto, para os espécimes de 3,5mm a incidência de poros era menor para a abertura de 0,6mm (50%) em comparação com a abertura de 0,0mm (70%). Os autores concluíram que a justaposição das juntas soldadas à Laser em estruturas de Ti-6Al-4V parece afetar a porcentagem de porosidade, visualizadas em exame radiográfico, dependendo do diâmetro das articulações. Essa influência teve correlação positiva para espécimes de diâmetro de 1,5mm, mas negativa para espécimes de 3,5mm.

Nomoto et al. (2010) avaliaram por meio de microtomografia, a presença de poros em junções de diferentes ligas (CoCr / CoCr, Ti / Ti e Ti / AuPt) soldadas à Laser. Também verificaram a influência das diferentes configurações das junções (com ranhura, sem ranhura, sobreposta e não sobreposta) sobre a resistência à tração. As amostras de Ti / AuPt apresentaram imagens com demasiados artefatos, o que não permitiu a avaliação tomográfica. Os mesmos também não foram avaliados no teste de tração, pois fraturaram antes do início do teste. Os autores concluíram que todas as junções apresentavam porosidade na região da solda, que variou de 0,01% a 0,17%. As fraturas ocorreram na maioria dos corpos de prova, no metal base. A pequena quantidade de poros nas junções não afetou a resistência à tração.

### **3- PROPOSIÇÃO**

- 1- Avaliar o comportamento mecânico de estruturas pré-fabricadas de liga Ti-6Al-4V variando o processo de soldagem (solda Laser e solda TIG), assim como a configuração da junção, utilizando método experimental de ensaio de flexão;
- 2- Quantificar a área de penetração das soldas após a ruptura das amostras, por meio de software de mensuração de imagens, e correlacionar com resistência a flexão.

## **4- MATERIAL E MÉTODOS**

#### **4.1- Delineamento experimental.**

1- *Unidade experimental*: barras de liga de Ti-6Al-4V seccionadas e soldadas com e sem material de adição.

2- *Fatores em estudo*: técnicas de soldagem em dois níveis (Solda Laser e Solda TIG) e desenho da junção em três níveis (desenho “I”, desenho “X” com chanfro de 30° e desenho “X” com chanfro de 45°).

3- *Variáveis respostas*: tensão máxima de flexão (MPa), área soldada (mm<sup>2</sup>) e morfologia da superfície de fratura.

4- *Método de análise*: Ensaio de flexão, mensuração da área soldada e microscopia eletrônica de varredura.

5- *Forma de análise dos dados*: para os dados de resistência flexural e área soldada foi empregada análise de variância fatorial em parcelas sub-divididas (2/3), sendo as parcelas tipo de solda em 2 níveis e desenho da junção em 3 níveis, além dos testes de Tukey e teste de Dunnett. Os dados da morfologia da superfície de fratura foram analisados de forma descritiva. Correlações de Pearson entre os dados obtidos foram realizados.

#### **4.2- Confecção e preparo dos corpos de prova.**

Os espécimes foram obtidos a partir de barras pré-fabricadas de liga de Ti-6Al-4V de 3,18mm de diâmetro (Realum, Indústria e Comércio de Metais Puros e Ligas Ltda, São Paulo, SP, Brasil), usinadas com 40mm de comprimento em torno mecânico (PRN 320 IMOR, Indústria Romi S.A., Santa Bárbara D'Oeste, SP, Brasil), lotado no Laboratório de Projetos Mecânicos Prof. Dr. Henner Alberto Gomide da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (LPM/FEMEC/UFU). Estes foram divididos em sete grupos (n=10): Grupo Controle, composto por corpos de prova intactos; Grupo LI soldados à Laser e chanfro com ângulo de 0°, LX30 soldados à Laser e chanfro em “X” com 30°, LX45 soldados à Laser e chanfro em “X” com 45°, Grupo TI soldados a TIG e chanfro topo a topo, Grupo TX30 soldados a TIG e chanfro em “X” com 30° e Grupo TX45 soldados a TIG e chanfro em “X” com 45° (Quadro 1).

**Quadro 1-** Distribuição/características dos grupos em função do tipo de solda e desenho da junção.

Grupos	Nº de amostras	Diâmetro (mm)	Tipo de Solda	Tipo de junção	Ângulo da junção (graus)
C	10	3,18	-	-	-
LI	10	3,18	Laser	“I”	0
LX30°	10	3,18	Laser	“X”	30
LX45°	10	3,18	Laser	“X”	45
TI	10	3,18	TIG	“I”	0
TX30°	10	3,18	TIG	“X”	30
TX45°	10	3,18	TIG	“X”	45

As informações sobre a composição da liga utilizada estão no Quadro 2 e suas propriedades mecânicas no Quadro 3. Os espécimes dos grupos experimentais foram seccionados ao meio, perpendicularmente aos seus longos eixos, para posteriormente serem soldados. As amostras do grupo controle foram mantidas intactas.

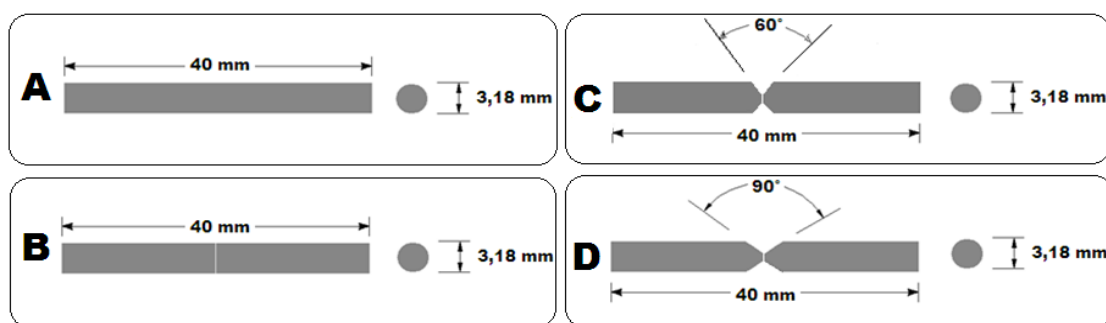
**Quadro 2:** Composição da liga TI-6AL-4V

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

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

<b>TI-6AL-4V</b>		
<b>Tensão de escoamento (Rp 0,2)</b>	-	950 MPa
<b>Resistência máxima a tração (RM)</b>	-	1020 MPa
<b>Alongamento</b>	-	14%
<b>Redução de área</b>	-	40%
<b>Tensão de Fadiga</b>	-	>10.000,000 ciclos
<b>Dureza Rockwell</b>	-	33 HRC
<b>Módulo de elasticidade</b>	-	120 GPa

Nos grupos TX30° e LX30° o chanfro foi executado com desenho em “X”, com encosto central plano de 1 mm, cujo ângulo total do chanfro correspondeu a 60° (Pantoja et al., 2012). Nos grupos TX45° e LX45° o chanfro foi executado com desenho em “X”, com encosto central plano de 1mm, cujo ângulo total do chanfro correspondeu a 90° (Silva, 2007) (Figura 1).



**Figura 1-** Geometria dos espécimes; A) Espécimes intactos; B) Espécimes com desenho do chanfro em “I”; C) Espécimes com desenho em “X” com 30° - chanfro de 60°; D) Espécimes com desenho em “X” com 45° - chanfro de 90°.

Após a usinagem, os corpos de prova tiveram as extremidades opostas àquela a serem soldada, numeradas 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, para facilitar sua identificação no momento da soldagem bem como no momento das demais avaliações.

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

#### 4.3- O processo de Soldagem

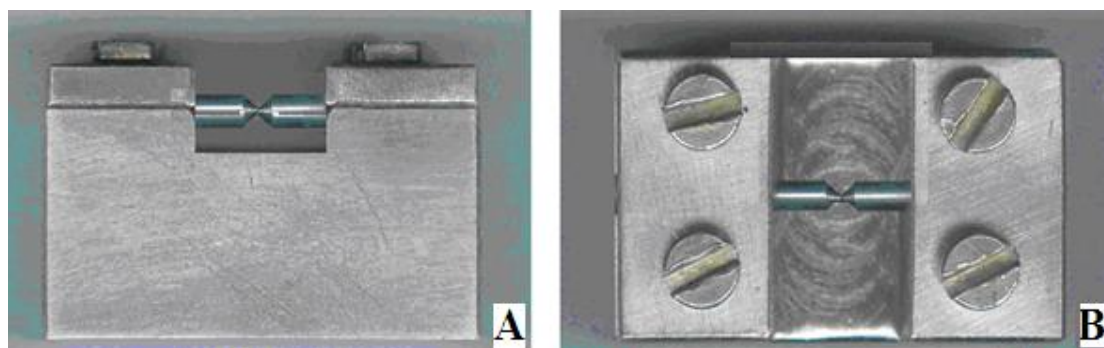
A soldagem TIG foi realizada com equipamento específico para uso odontológico (modelo NTY 60, Kernit – Indaiatuba, SP – Brasil) regulado em potência de 5A e tempo de 3ms. O eletrodo foi posicionado perpendicularmente à peça a ser soldada, em distância de 0,5mm, seguindo a recomendação do fabricante (Cavalcante et al., 2009). Para as junções com desenho em “I”, foram feitos inicialmente quatro pontos de solda, diametralmente opostos e os demais pontos foram feitos até se obter a união completa dos segmentos. Para as junções com desenho em “X” foram feitos dois pontos para unir a parte central da junção e em média mais quatro pontos com material de adição (fio de 1mm de diâmetro de liga Ti-6Al-4V) até o preenchimento total da junção. A cada dois disparos a limpeza do eletrodo foi realizada. O tempo de pré-fluxo e pós-fluxo do gás argônio foi de 2s e a taxa de vazão foi de 10 L/s.





**Figura 2-** A) Aparelho de solda TIG Kernit; B) Operador executando a solda.

Para padronização do processo de soldagem, os espécimes foram fixados em matriz metálica (Figura 3), construída especificamente para este fim, permitindo que os espécimes fossem soldados, devidamente alinhados e justapostos.



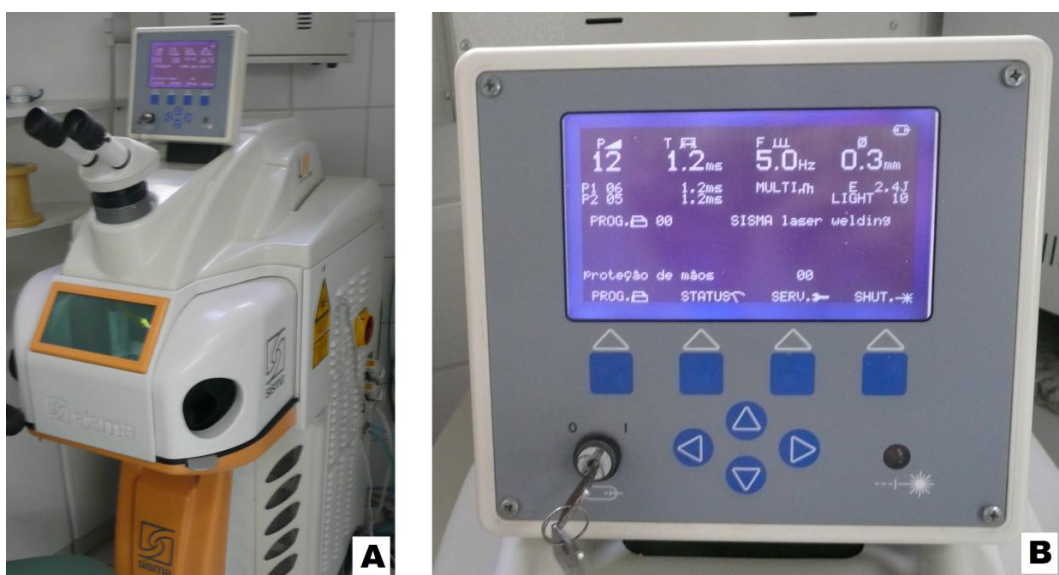
**Figura 3-** Matriz metálica para a padronização da posição de soldagem. A) Vista Superior; B) Vista frontal.

#### 4.4- O processo de Soldagem Laser

A soldagem Laser foi realizada em uma soldadora à Laser (Sisma LM 500, Schio - Itália), que utiliza um cristal de Nd:YAG como fonte de luz, programada para potência (P) 12V, tempo (T) 1.2ms, frequência (F) 5.0Hz, diâmetro ( $\varnothing$ ) 0,3mm e

Energia (E) de 2,4J, de propriedade de laboratório de prótese dental privado na cidade de Uberlândia (MG) (Figura 4).

Para a soldagem das junções com desenho em “I”, os espécimes foram fixados na matriz metálica (Figura 3) e levados ao interior da câmara de soldagem do equipamento. Foram feitos inicialmente quatro pontos de solda em regiões diametralmente opostas, sob atmosfera protetora de argônio. Após isso, os espécimes foram removidos da matriz para facilitar a execução do restante da soldagem, sendo feitos tantos pontos quantos necessários para a união completa da junção. Para as junções com desenho em “X” foram feitos inicialmente 4 pontos de solda na região central da junção e, com o uso de material de adição (fio de 0,2mm de diâmetro de liga Ti-6Al-4V) foram feitos tantos pontos quantos necessários até o preenchimento total da junção.



**Figura 4-** A) Aparelho Sisma LM 500, B) Display com os parâmetros utilizados.

#### **4.5- Análises não destrutivas para avaliação da qualidade da solda**

As avaliações não destrutivas empregadas para avaliar a qualidade da solda neste trabalho consistiram em dois testes: inspeção radiográfica e teste com líquidos penetrantes.

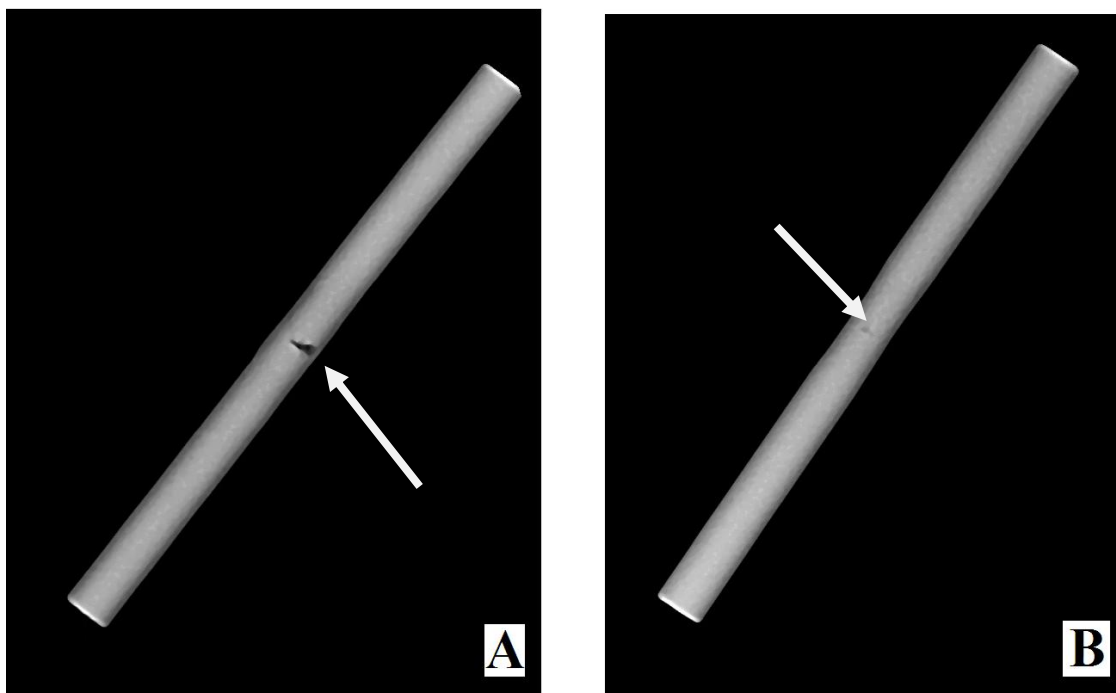
A avaliação radiográfica foi realizada para investigar bolhas e porosidades no interior da junção soldada (Wang & Boyle, 1993; Nuñez et al., 2011; Nuñez-Pantoja et

al., 2011a). Após o processo de soldagem, os espécimes foram expostos a radiação (70KV, 7mA, 1,5s e distância de 10cm), utilizando placas de fósforo de sistema periapical digital (Scan X Duo, Air Techniques CO., Hicksville, EUA), para verificar possíveis defeitos internos que não puderam ser vistos a olho nu (Figura 5A e B).



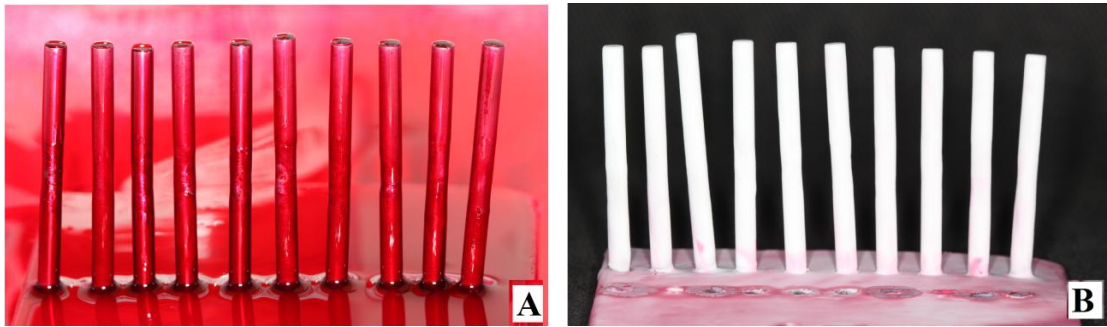
**Figura 5-** A) Aparelho Scan X Duo; B) Placas de Fósforo.

Após a exposição das placas de fósforo aos raios-X, foram feitas as aquisições das imagens digitais no aparelho de leitura do sistema. As imagens foram visualmente examinadas, para verificar a presença de bolhas e porosidades na região da junção. Estas falhas se mostraram como áreas radiolúcidas, na região central da junção e os espécimes que apresentaram falhas extensas (Figura 6A) foram descartados (10 amostras soldadas a TIG) e substituídos por outros, preparados de maneira idêntica aos espécimes descartados. Aqueles que apresentavam falhas menores que subjetivamente teriam menor influência nos resultados dos testes flexurais foram considerados aptos para o teste (Figura 6B).



**Figura 6-** Exemplos de imagem radiográfica. A) Espécime com defeito extenso na região da solda; B) Espécime com defeito aceitável na região da solda. Setas indicam a localização do defeito.

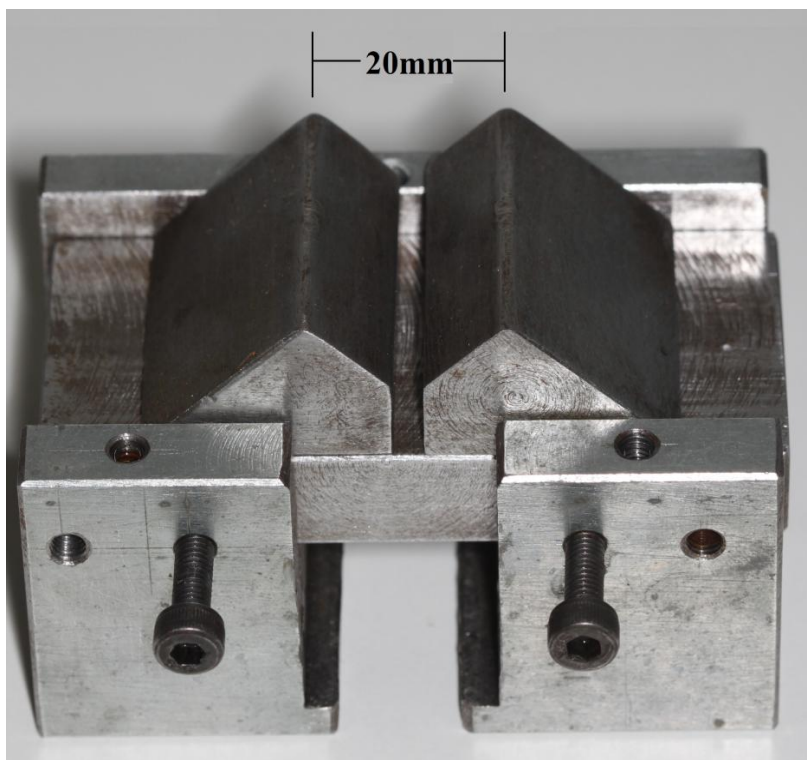
O ensaio com líquidos penetrantes buscou detectar discontinuidades que fossem abertas superficialmente, tais como trincas, poros, dobras, etc. Este método tem sua aplicação indicada para todos os materiais sólidos não porosos ou cuja superfície não seja muito grosseira (Garcia, 2000). As amostras separadas por grupos foram submetidas à limpeza inicial para remoção de todos contaminantes com álcool 70% e secos. Em seguida foram fixadas verticalmente por uma de suas extremidades, com o uso de lâmina de cera branca nº7 (Asfer, São Caetano de Sul, Brasil) e aplicou-se o líquido penetrante de cor vermelha em toda sua extensão (Metal-Chek, VP 30, Bragança Paulista, Brasil) (Figura 7A). Aguardou-se 5min, para depois remover o excesso do líquido com água corrente e em seguida foram secos em papel absorvente. Aplicou-se o revelador (Metal-Chek, D 70, Bragança Paulista, Brasil) aguardando o tempo de 5min de acordo com as recomendações do fabricante (Figura 7B). Como resultado desse teste as regiões que apresentam defeitos, como trincas ou falhas internas com comunicação com a superfície do metal, se mostram com uma cor vermelha, se destacando na superfície de cor branca resultante da aplicação do revelador.



**Figura 7-** Exemplo de espécimes submetidos ao teste com líquido penetrante. A) Líquido penetrante aplicado; B) Líquido revelador aplicado.

#### **4.6- Mesa para ensaio**

Para posicionamento e fixação dos espécimes na máquina de ensaio mecânico (EMIC, 2000DL) foi utilizada uma mesa para ensaio de três pontos (Figura 8). O dispositivo para ensaio de flexão apresenta distância entre os apoios de 20 mm (Anusavice et al. 1985; Yamagishi et al.,1993; Cavalcante et al. 2012) e os cilindros de apoio da base possuem 3mm de diâmetro. A padronização visa permitir a reprodução do estudo e diminuir as variáveis que podem influenciar os resultados.

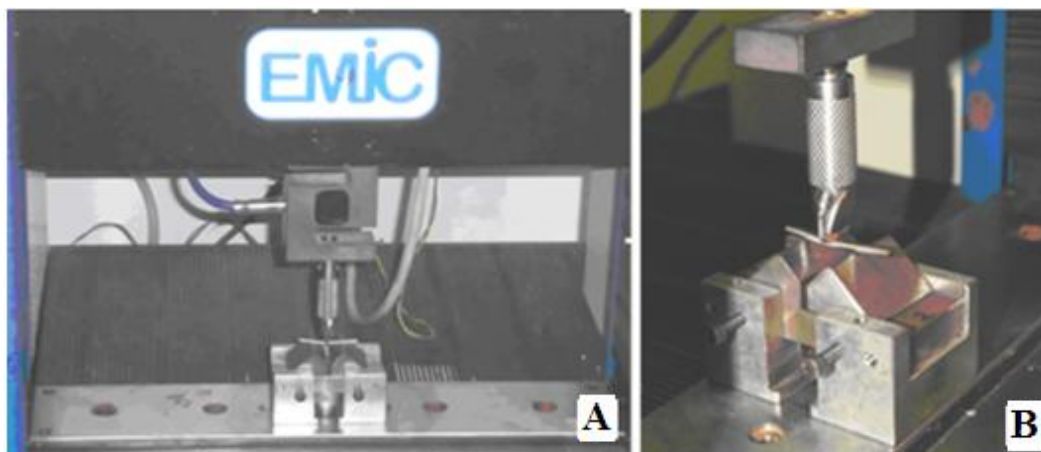


**Figura 8-** Mesa para ensaio de flexão de três pontos.

#### **4.7- Ensaio mecânico de flexão.**

O ensaio de resistência à flexão de três pontos foi realizado em máquina de ensaio mecânico EMIC 2000 DL (São José dos Pinhais – PR – Brasil), lotada no Laboratório Integrado de Pesquisa Odontológica (LIPO) da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal de Uberlândia (Figura 9). A célula de carga utilizada foi de 500N e velocidade de 0,5mm / min (Cardoso, 2007). Para caracterizar o ensaio no sentido de descida, a velocidade de retorno foi de 500mm / min , limite de carga máxima de 4500N e colapso a 20%. O ensaio foi considerado finalizado com a fratura ou com a deformação plástica / permanente da barra, respeitando deslocamento máximo de 5mm durante o ensaio. A transmissão da força foi feita por intermédio de uma ponta de aço com 3,0mm de diâmetro que entrou em contato com o centro do espécime (Anusavice et al., 1985, Silva, 2007).





**Figura 9-** A) EMIC 2000 DL; B) Ponta aplicadora de força.

#### **4.8- Mensuração da área soldada.**

A fim de se obterem imagens para o cálculo da área soldada, os pares resultantes após fratura dos espécimes foram posicionados verticalmente em apoio metálico, forrado com cera utilidade e fotografados com equipamento digital Canon Rebel EOS T1i, 15,1 megapixels, lente Canon macro 100mm e flash circular Canon Macro Ring Lite MR – 14 EX (Canon USA, Lake Success, NY). Um espécime intacto foi posicionado entre os pares para calibragem da imagem. O equipamento fotográfico foi fixado em apoio metálico com ajuste vertical de altura e regulado para uma distância de aproximadamente 15cm do objeto, sendo os parâmetros ajustado para função “Grande Plano” (macro) e modo automático (Figura 10: A, B e C).

Utilizou-se o software Motic Images Plus 2.0ML for Windows (Motic instruments, INC, Richmond, Canadá) para mensuração das áreas soldadas. Em cada superfície de fratura, delimitou-se inicialmente o contorno periférico da área soldada. Com isso, o software emitiu automaticamente a área total da superfície de fratura. Em seguida delimitou-se a área interna não soldada, para a qual foi também emitido automaticamente o valor da área correspondente. Então o valor da área não soldada foi subtraída da área total, obtendo-se assim o valor da área soldada para cada espécime fraturado. O valor final da área soldada para cada espécime correspondeu a média dos valores de ambos os fragmentos resultantes da fratura do espécime.



**Figura 10-** A) Máquina posicionada para realização das fotografias; B) Parâmetros no display; C) Exemplo de imagem obtida.

#### 4.9- Análise por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Após avaliação fotográfica, dois segmentos representativos de cada grupo foram seccionados próximos à área de solda, por meio de disco de *carborundum* acoplada à peça reta em motor elétrico. Em seguida foram colocados em aparelho de ultra-som (Thornton T14) por 10min para realizar a limpeza da superfície e posteriormente foram desidratados em estufa por 48h. Os segmentos foram então colados em *stubs*, com adesivo específico (Brand Conductive Double Sided Carbon Adhesive Tape) e levados ao MEV (Figura 11).

A análise efetuada nas imagens da superfície de fratura obtidas por meio de MEV teve por objetivo a caracterização morfológica da ZAC. O equipamento utilizado (MEV/EDS) está lotado no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Faculdade de Odontologia de Piracicaba (UNCAMP. Piracicaba- SP).





**Figura 11-** Microscópio eletrônico de varredura (MEV) associado ao Espectrômetro de energia dispersiva de Raios-X (EDS).

#### **4.10- Cálculo da tensão de flexão**

Foi empregada fórmula específica para ensaios utilizando corpos de secção circular, para obtenção da tensão máxima de flexão (MPa):

$$TF = \frac{8.Q.L}{\pi.D^3}$$

Fórmula 1: TF= tensão de flexão (MPa); Q= carga de fratura ou limite elástico (N); L=distância entre apoios da base (mm); D= diâmetro da peça (mm).

#### **4.11- Análise estatística**

Na análise inicial, o objetivo principal foi determinar a influência dos dois fatores envolvidos no estudo: tipo de solda e tipo de junção para os dados de tensão máxima de flexão e área soldada. Portanto, os dados para estes dois fatores foram analisados por meio de Análise de Variância Fatorial (2 x 3) seguido do teste de Tukey. Na segunda análise, apenas os dados de tensão máxima de flexão foram analisados com Análise de Variância em fator único seguido do teste de Dunnett para avaliar a diferença

entre o grupo controle e os seis grupos experimentais. Foi aplicada a correlação de Pearson para os fatores tipo de solda e tipo de junção. Para todos os testes foram consideradas diferenças estatística para  $\alpha=0,05$ .

## **5- RESULTADOS**

Os resultados serão apresentados em quatro divisões: tensão máxima de flexão, área soldada, correlação de Pearson e MEV.

### 5.1- Tensão máxima de flexão

Análise de variância (ANOVA fatorial) foi realizada para comparação dos valores de tensão máxima de flexão frente aos fatores tipo de solda e tipo de junção (Tabela 1). Os fatores tipo de solda ( $p < 0,001$ ) e tipo de junção ( $p < 0,001$ ) foram estatisticamente significantes para os valores de tensão máxima de flexão. No entanto, não houve significância para a interação entre estes dois fatores ( $p = 0,205$ ).

**Tabela 1-** ANOVA fatorial ( $4 \times 2$ ) para os valores de tensão máxima de flexão para os grupos experimentais

Fontes de Variação	Df	Soma dos	Quadrado	F	p
		Quadrado	Médio		
<b>Solda</b>	1	5716901,8	5716901,8	74,8	<0,001
<b>Junção</b>	2	3415932,9	1707966,5	22,3	<0,001
<b>Solda x Junção</b>	2	249786,0	124893,2	1,7	0,205
<b>Residual</b>	54	4127947,7	76443,5		
<b>Total</b>	59	13510568,4	228992,7		

A Tabela 2 mostra a comparação entre os valores de tensão máxima de flexão para um mesmo tipo de junção quando soldada à Laser ou a TIG (avaliação horizontal com letras maiúsculas) e entre os três tipos de junções quando soldadas por meio de cada um dos processos (avaliação vertical com letras minúsculas). O teste de Tukey mostrou que as junções em X30° e X45° não apresentaram diferenças significantes nos valores médios de tensão máxima de flexão e ambas resultaram em valores significativamente maiores que a junção “I”, independente do tipo de solda. Comparando o tipo de solda, o teste de Tukey mostrou que a solda TIG resultou em tensão máxima de flexão significativamente maior que a solda Laser, independente do tipo de junção.

**Tabela 2-** Médias (MPa) e Desvio-Padrão de Tensão Máxima de Flexão comparando os fatores em estudo (tipo de junção e tipo de solda), categorias estatísticas definidas pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ).

Junção	Solda	
	Laser	TIG
I	$1134,9 \pm 400,3^{Bb}$	$1906,3 \pm 184,5^{Ab}$
X30°	$1831,8 \pm 259,8^{Ba}$	$2287,4 \pm 226,0^{Aa}$
X45°	$1673,3 \pm 340,2^{Ba}$	$2298,3 \pm 173,4^{Aa}$

\* Letras diferentes indicam diferenças significativas. Letras maiúsculas usadas para comparação na horizontal (Tipo de solda) e letras minúsculas na vertical (Tipo de junção).

Análise de variância em fator único foi realizada para a comparação entre as médias e desvio-padrão obtidos para os grupos experimentais, em relação ao grupo controle (Tabela 3). O teste de Dunnett mostrou que os grupos TX30° e TX45° resultaram em valores de tensão máxima de flexão semelhante ao grupo controle. Os demais grupos experimentais resultaram em valores significativamente menores que o grupo controle.

**Tabela 3-** Médias (MPa) e Desvio-Padrão de Tensão Máxima de Flexão para os grupos experimentais em comparação ao grupo controle, e valores de p calculado pelo teste Dunnett.

Grupos	Média (DP)	Valor de p	Significância vs Grupo Controle (Teste de Dunnett)
Controle	2311,0 ± 55,4	-	-
LI	1134,9 ± 400,3	p <0,001	*
LX30°	1831,8 ± 259,8	p = 0.002	*
LX 45°	1673,3 ± 340,2	p <0,001	*
TI	1906,3 ± 184,5	p = 0,013	*
TX30°	2287,4 ± 226,0	p = 0,990	NS
TX45°	2298,3 ±173,4	p = 0,995	NS

\*Dados foram analisados por meio de ANOVA em fator único seguido pelo teste de Dunnett (p< 0,05).

## 5.2- Área soldada

Análise de variância fatorial mostra os resultados para comparação dos valores de área soldada frente aos fatores tipo de solda e tipo de junção (Tabela 4). Para a área soldada não houve significância em relação ao tipo de solda (p=0,408). No entanto, os fatores tipo de junção (p<0,001) e a interação entre o tipo de solda e tipo de junção (p<0,001) foram estatisticamente significantes para os valores de área soldada.

**Tabela 4-** ANOVA fatorial ( $4 \times 2$ ) para os valores de área soldada para os grupos experimentais.

<b>Fontes de Variação</b>	<b><i>Df</i></b>	<b>Soma dos</b>		<b>F</b>	<b><i>P</i></b>
		<b>Quadrado</b>	<b>Quadrado Médio</b>		
<b>Solda</b>	1	0,2	0,1	0,7	0,408
<b>Junção</b>	2	84,4	42,2	145,9	<0,001
<b>Solda x Junção</b>	2	9,0	4,5	15,6	<0,001
<b>Residual</b>	54	15,6	0,3		
<b>Total</b>	59	109,2	1,9		

A Tabela 5 mostra a comparação entre os valores de área soldada para um mesmo tipo de junção quando soldada à Laser ou a TIG e entre os três tipos de junções quando soldadas por meio de cada um dos processos. O teste de Tukey mostrou que as junções X30° e X45° não apresentaram diferenças significantes nos valores médios de área soldada e ambas resultaram em valores de área soldada significativamente maiores que a junção “I” para a solda Laser. Por outro lado, a junção em X45° resultou em significativamente maior área soldada que a junção X30° e esta maior que a junção “I” para a solda TIG. Comparando o tipo de solda, o teste de Tukey mostrou que a solda TIG resultou em área soldada significativamente maior que a solda Laser para a junção “I” e significativamente menor para a junção X30°.

**Tabela 5-** Médias (mm<sup>2</sup>) e Desvio-Padrão da área soldada comparando os fatores em estudo (tipo de junção e tipo de solda), categoriais estatísticas definidas pelo teste de Tukey (p<0,05).

Junção	Solda	
	Laser	TIG
I	3,6 ± 0,6 <sup>Bb</sup>	4,7 ± 0,4 <sup>Ac</sup>
X30°	6,9 ± 0,6 <sup>Ba</sup>	6,0 ± 0,6 <sup>Ab</sup>
X45°	6,7 ± 0,4 <sup>Aa</sup>	6,8 ± 0,5 <sup>Aa</sup>

\* Letras diferentes indicam diferenças estatísticas. Letras maiúsculas usadas para comparação na horizontal (Tipo de solda) e letras minúsculas na vertical (Tipo de junção).

### 5.3- Correlação de Pearson

A Tabela 6 apresenta o coeficiente de correlação de Pearson entre as variáveis *área soldada* e *tensão máxima de flexão*. A correlação encontrada é moderada (0.5520) e significativa (p<0.0001).

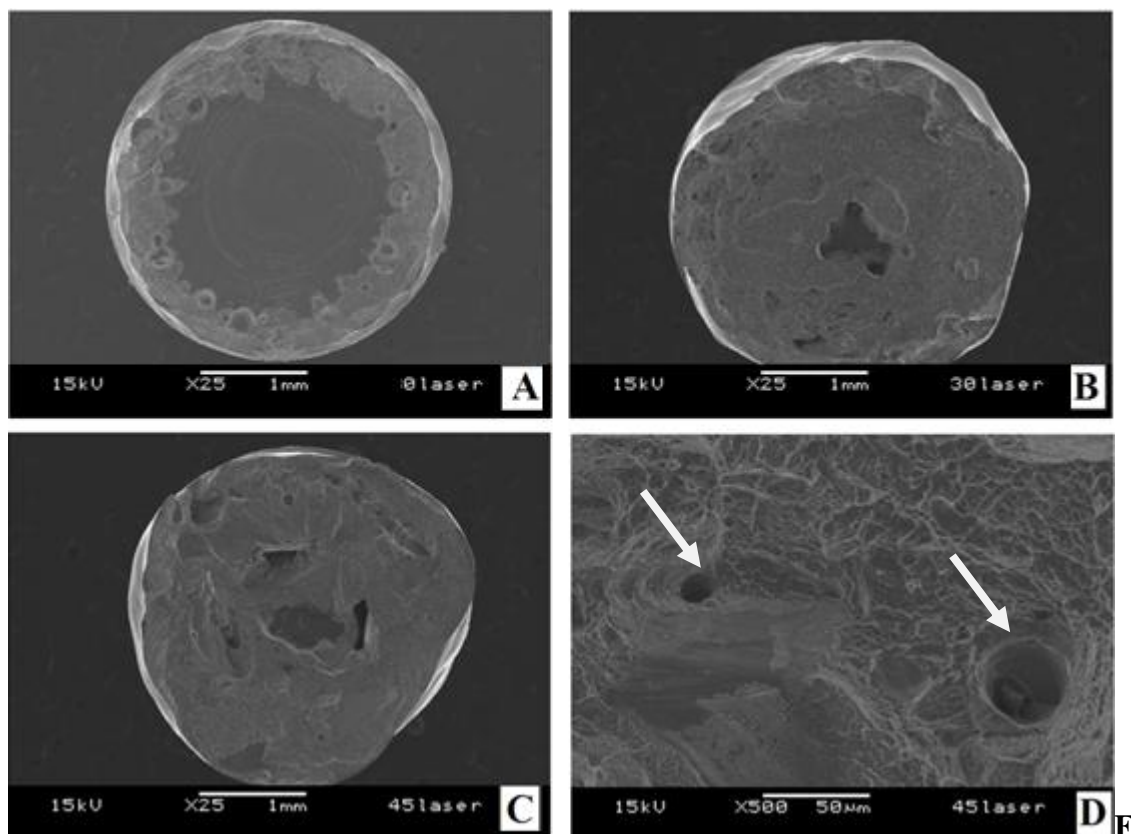
**Tabela 6** – Correlação de Pearson entre as variáveis AMS e Tensão

Correlação	p valor
0.5520	<0.0001



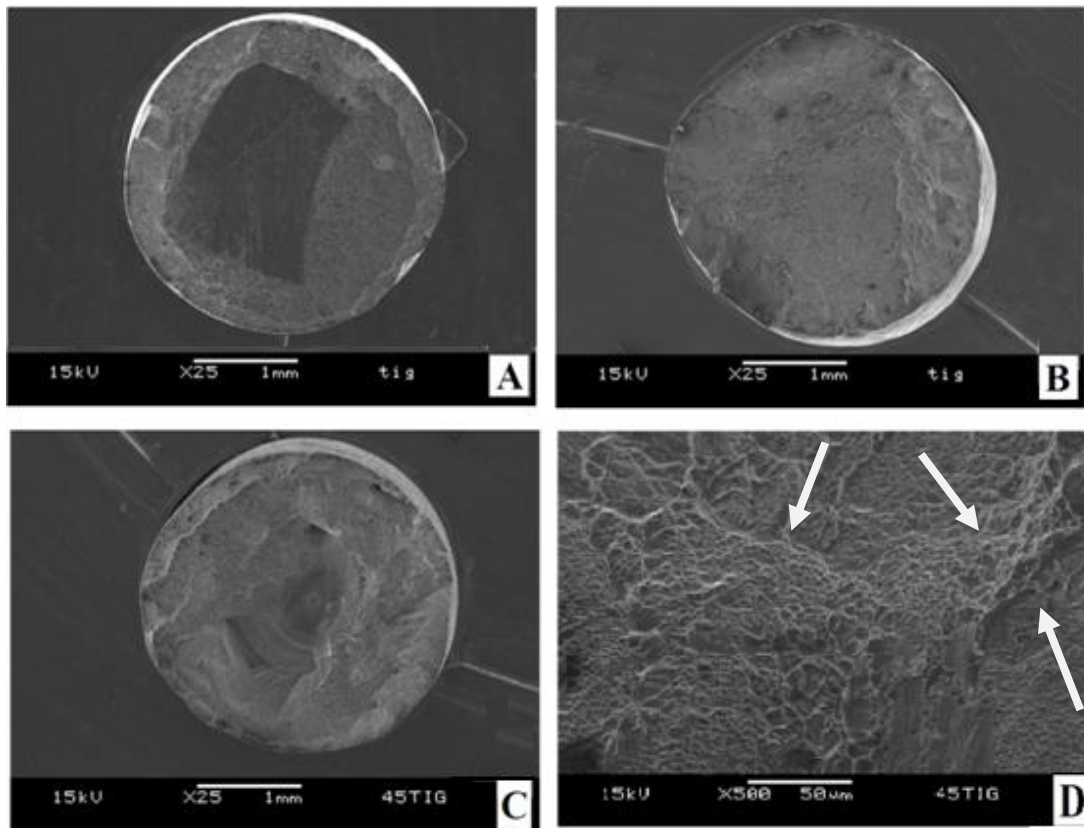
#### 5.4- MEV

Na avaliação das imagens obtidas por meio de MEV das superfícies de fratura de amostras representativas do grupo Laser (Figuras 12 A, B, C e D), foi possível observar maior incidência de poros (setas), superfície com relevo menos irregular e com disposição menos complexa (Figura 12D).



**figura 12-** Amostras de imagens de MEV de espécimes do grupo Laser. A) Amostra do grupo LI (Magnitude de 25X); B) Amostra do grupo LX30° (Mag. 25X); C) Amostra do grupo LX45° (Mag. 25X); D) Amostra do grupo LX45° (Mag. 500X); Setas indicam a presença de poros.

As Figuras 13 A, B, C e D mostram as imagens das superfícies de fratura obtidas por meio de MEV para o grupo TIG. Foi possível observar menor incidência de poros nas superfícies de fratura quando comparadas àquelas obtidas das superfícies do grupo Laser. Também foi possível notar uma superfície com relevo mais irregular e com disposição mais complexa. A presença nítida de *dimples* (setas) sugere maior ductibilidade nestas junções (Figura 13D).



**Figura 13-** Amostras de imagens de MEV de espécimes do grupo TIG. A) Amostra do grupo TI (Mag. 25X); B) Amostra do grupo TX30° (Mag. 25X); C) Amostra do grupo TX45° (Mag. 25X); D) Amostra do grupo TX45° (Mag. 500X); Setas indicam a presença de *dimples*.



A primeira hipótese foi aceita uma vez que o desempenho do desenho da junção em “X” foi superior em relação ao desenho da junção em “I”. A segunda hipótese foi rejeitada, pois o processo de soldagem TIG resultou em maiores valores de resistência à flexão para todos os desenhos de junção quando comparado com o processo de soldagem à Laser. A terceira hipótese foi rejeitada, pois a variação no ângulo da junção “X” em 30 e 45° não resultou em diferença significativa nos dados obtidos frente ao esforço flexural, para os dois processos de soldagem avaliados.

O tipo de liga metálica, o diâmetro da peça, os parâmetros utilizados no equipamento de solda e o desenho são fatores que influenciam a resistência mecânica das junções soldadas (Wang & Welsch, 1995; Liu et al., 2002; Bertrand & Poulon-Quintin, 2010). A capacidade de penetração da solda está diretamente relacionada com a combinação e variação desses fatores. A penetração é o principal fator que afeta a resistência das junções soldadas, pois uma penetração incompleta resulta em falhas, com permanência de áreas internas não soldadas (Baba & Watanabe, 2005). Poros, juntamente com trincas e falhas no interior da junção, funcionam como concentradores de tensão, podendo levar a falência mecânica prematura das infraestruturas (Bertrand & Poulon-Quintin, 2010).

A baixa densidade do titânio ( $4,2\text{g/cm}^3$ ) permite o uso de radiografias periapicais para investigar a presença de porosidade nas infraestruturas e os defeitos internos em amostras a serem testadas (Wang & Boyle, 1993; Nuñez et al., 2011). Uma vantagem importante desse método é evidenciar defeitos internos que não poderiam ser vistos a olho nu (Zavanelli & Henriques, 2001). No presente estudo, a avaliação radiográfica foi eficaz em evidenciar os vazios internos decorrentes de penetração insuficiente, em função das maiores dimensões deste tipo de falha (Figuras 6A e B). Estas falhas se mostraram como áreas radiolúcidas, na região central da junção, porém não foi possível fazer uma distinção entre os vazios internos e os poros ou trincas. Neste caso, uma avaliação por meio de microtomografia seria mais indicada (Nomoto et al., 2010). Os espécimes cujas imagens radiográficas mostraram defeitos extensos foram descartados e substituídos previamente ao ensaio mecânico.

Em soldagem, pequenos defeitos nas junções podem ser usualmente aceitos, porém, frequentemente resultam em falhas prematuras da infraestrutura (Tehini & Stein, 1993). O método de detecção de falhas superficiais por meio de líquidos penetrantes foi empregado neste estudo com a finalidade de detectar discontinuidades que fossem

abertas superficialmente, tais como trincas, poros, dobras, etc. (Garcia et al., 2000) (Figuras 7A e B). No entanto, os espécimes não apresentaram evidências de defeitos superficiais após o teste, o que sugere que ambos os processos de soldagem foram eficientes em promover um perfeito acabamento superficial da área soldada.

Os dados referentes ao parâmetro área soldada (Tabela 5) mostram que para o desenho da junção “I”, os valores foram significativamente menores que os obtidos para os espécimes com desenho “X”, tanto para o processo de soldagem TIG, quanto para o processo de soldagem à Laser. Isto provavelmente ocorreu devido à limitada penetração da solda para ambos os processos de soldagem. A união incompleta na região central dos espécimes com desenho “I” (Figura 6) resultaram em vazios internos com significativa diminuição da resistência à flexão desses espécimes. Estudos têm demonstrado que quando se emprega o desenho “I” em espécimes de liga de Ti com diâmetro superior a 3mm, a penetração da solda pode ficar prejudicada, e consequentemente ocorre a diminuição da resistência da solda (Nuñez-Pantoja et al., 2011b; Pantoja et al., 2012). Estes achados são corroborados pelos resultados do presente estudo, pois o emprego do desenho “I” resultou em menores valores de resistência, independente do tipo de processo de soldagem (Tabela 2).

O desempenho das junções soldadas em “X” evidenciou a superioridade desta em relação à configuração “I”, tanto utilizando o processo de soldagem à Laser quanto para o processo TIG (Tabela 2). A confecção de chanfro em junções visa diminuir a secção transversal da peça, permitindo que a fonte de calor gerado pelo equipamento atinja o centro da região e assim obter união completa das partes (Silva, 2007). Este procedimento se mostrou eficaz para superar as limitações de penetração dos processos de soldagem utilizados neste experimento.

A variação na angulação do desenho da junção em “X” em 30 e 45° foi proposto para verificar se uma abertura maior ou menor no chanfro resultaria em diferentes valores de resistência à flexão. No entanto, a variação do ângulo dentro dos limites utilizados não influenciou significativamente os valores de resistência à flexão. Na prática, o desenho da junção com ângulo de 30° se mostrou mais vantajoso, pois exigiu menor tempo para completar o preenchimento do chanfro, consumindo assim menor quantidade de material de adição e de gás de proteção para ambos os processos de soldagem.

O processo de soldagem TIG, além de conferir maior resistência às junções, foi o único a alcançar valores similares aos obtidos pelo grupo controle, quando os desenhos em “X” foram empregados (Tabela 2). No processo TIG, o preenchimento da junção se dá em maior volume para cada pulso aplicado, em função do maior diâmetro da poça de fusão, decorrente de uma maior entrada de calor (Cardoso, 2007). Na prática isso é vantajoso, pois permite finalizar a soldagem em menor tempo e com menor consumo de gás de proteção. Este fato também pode ser um dos fatores para justificar a maior resistência das junções chanfradas soldadas à TIG, pois o volume final desta tende a ser maior que o volume final da junção soldada à Laser, neste caso sendo também influenciada pela técnica e pelo operador (Hart & Wilson, 2006).

A análise das superfícies fraturadas por meio de MEV sugere maior ocorrência de poros na superfície dos espécimes soldados à Laser (Figura 12D). Esses poros são provavelmente atribuídos à incorporação de gases tal como o argônio e o oxigênio presentes na câmara do equipamento (Liu et al., 2002). A nítida presença de poros nesses espécimes parece indicar que houve maior contaminação por gases. Este fato parece justificar o desempenho inferior nos resultados de resistência à flexão dos espécimes soldados à Laser.

Outro fator relevante observado nas imagens do MEV foram as ondulações presentes na superfície de fratura dos espécimes do grupo TIG (Figura 13D), as quais são denominadas *dimples* (Wang & Welsch, 1995), que se mostraram mais nítidas e com disposição mais complexa quando comparadas àquelas presentes na superfície de fratura do grupo Laser. Estudos têm demonstrado que a formação dos *dimples* em regiões de fratura é característica do comportamento de materiais dúcteis (Liu et al., 2002). A presença de *dimples* mais nítidos e complexos nas superfícies fraturadas dos espécimes do grupo TIG, evidencia que este processo foi capaz de preservar algum grau de ductilidade do material original, em maior proporção que o processo Laser.

Os valores de área soldada dos grupos com desenho em “X” mostram que, para ambos os processos de soldagem, este modelo permitiu maior penetração da solda. Isto justifica os maiores valores de tensão máxima de flexão alcançada por este modelo, quando comparados ao desenho em “I”, confirmando que seu emprego minimizou as limitações de penetração de ambos os processos de soldagem utilizados neste estudo.

De modo diferente ao observado para o parâmetro resistência flexural, onde os valores médios obtidos para o grupo TIG foram significativamente superiores às médias

do grupo Laser, para o parâmetro área soldada, isto não foi igualmente encontrado. Ao comparar os dois processos de soldagem, verificamos que somente os desenhos “I” e X30° apresentaram diferença estatística entre si. Usando o desenho “I” a solda TIG obteve maior penetração, porém para o desenho X30°, a maior penetração foi obtida pelo processo Laser. Para o desenho X45° não houve diferença significativa na penetração obtida por ambos os processos. Embora a solda Laser tenha obtido resultados satisfatórios em termos de área soldada, isto não se refletiu na resistência mecânica dessas junções, possivelmente devido a uma maior incidência de poros (Nuñez-Pantoja et al., 2011a) e menor ductibilidade da solda (Wang & Welsch, 1995), como visto anteriormente com base nas imagens de MEV.

Ao se correlacionar as variáveis área soldada e tensão máxima de flexão verificou-se que a correlação é moderada (0.5520) e significativa ( $p < 0.0001$ ), ou seja, à medida que se obteve um aumento na área soldada, observou-se também um aumento moderado na resistência flexural dos espécimes. Este achado reforça relatos da literatura que apontam a capacidade de penetração da solda como um importante fator para obtenção de infraestruturas soldadas resistentes (Baba & Watanabe, 2005). Tanto para a solda à Laser quanto para a TIG, quando se obteve uma maior penetração por meio do uso do desenho “X”, maiores valores de tensão máxima de flexão foram alcançados.

De maneira oposta aos resultados obtidos no presente estudo, um experimento anterior comparando espécimes soldados utilizando os processos TIG e Laser por meio de testes de fadiga (Pantoja et al., 2012), não encontrou diferença significativa na resistência das amostras com configuração da junção em “X” para os dois processos avaliados. O mesmo trabalho mostrou ainda que para o desenho da junção em “I” justaposto, a solda Laser foi mais eficiente que a solda TIG quando submetida ao teste de ciclagem mecânica. Os resultados encontrados por estes autores diferem dos obtidos neste estudo, demonstrando que o comportamento das junções varia de acordo com o teste mecânico empregado e que a fadiga mecânica pode ser fator determinante para a resistência de junções soldadas. Portanto, resultados isolados têm valores relativos considerando que, quando em função, as estruturas protéticas não estão sujeitas apenas a um tipo de esforço, mas sim a uma combinação de fatores que envolvem esforços de flexão (combinação de compressão e tração), dobramento, torção e/ou cisalhamento, além de fadiga termomecânica a que estas estruturas estão sujeitas (Cardoso, 2007). Diante disso, podemos inferir que resultados de testes mecânicos *in vitro* não podem ser transferidos diretamente para a prática clínica, mas sim orientar a busca de parâmetros

mais adequados quanto às etapas laboratoriais (Cavalcante et al., 2012), norteados o treinamento e calibração dos técnicos dos laboratórios de prótese (Silva et al., 2012).

Tendo em vista que a longevidade das infraestruturas é fator primordial no sucesso das reabilitações protéticas e que a resistência aos esforços flexurais é um componente significativo desse processo, fica evidente a importância de se buscar por meio de testes mecânicos, as melhores opções para confecção das reabilitações protéticas. Os resultados obtidos neste estudo indicam que o uso do desenho em “X” aumenta a capacidade de penetração e a resistência flexural, em junções de liga de Ti-6Al-4V de 3,18mm de diâmetro, soldadas tanto por meio do processo TIG quanto Laser e que o processo TIG é o mais eficaz nestas circunstâncias. No entanto, novos estudos são necessários para o estabelecimento de um protocolo de soldagem que minimize as falhas em cada uma das etapas do método de confecção de infraestruturas e potencialize as vantagens dos processos TIG e Laser. Neste sentido, futuras pesquisas utilizando microtomografia, testes cíclicos de fadiga termodinâmica, testes de dureza e avaliação da deformação decorrente do uso dos processos de soldagem certamente acrescentarão dados valiosos, orientando e otimizando a aplicação destes importantes métodos de soldagem.





Dentro das limitações desse estudo *in vitro* foi possível concluir que:

- 1- O desenho da junção em “X” apresentou maior resistência aos esforços flexurais e maior penetração da solda, para os dois processos de soldagem utilizados;
- 2- O processo de soldagem TIG conferiu resistência flexural significativamente superior ao processo Laser em todos os modelos de junção utilizados;
- 3- A variação do ângulo da junção em “X” em 30° e 45°, não influenciou significativamente os resultados de resistência flexural para ambos os processos de soldagem;
- 4- O desempenho da solda TIG foi superior ao processo Laser quanto à penetração da solda para o desenho “I”, porém inferior para o desenho da junção X 30°;
- 5- O aumento da área soldada resultou no aumento da resistência flexural para os dois processos de soldagem.

## **REFERÊNCIAS\***

---

\* De acordo com a Norma da FOUFU, baseado nas Normas de Vancouver. Abreviaturas dos periódicos em conformidade com Medline, (Pubmed)

American Welding Society - AWS, **Rules for welding in structural steel**. 1992.

Anusavice KJ, Okabe T, Galloway SE, Hoyt DJ, Morse PK. Flexure test evaluation of presoldered base metal alloys. **J Prosthet Dent**. 1985 Oct;54(4):507-17.

Baba N, Watanabe I. Penetration depth into dental casting alloys by Nd:YAG laser. **J Biomed Mater Res B Appl Biomater** 2005 Jan;72(1):64–8.

Barbosa GA, Simamoto Júnior PC, Fernandes Neto AJ, de Mattos Mda G, Neves FD. Prosthetic laboratory influence on the vertical misfit at the implant/UCLA abutment interface. **Braz Dent J**. 2007;18(2):139-43.

Berg E, Wagner WC, Davik G, Dootz ER. Mechanical properties of laser-welded cast and wrought titanium. **J Dent Prosthet**. 1995 Set;74(3):251-7.

Bertrand C, Poulon-Quintin A. Proposals for optimization of laser welding in prosthetic dentistry. **J Prosthodont** 2010 Jan;19(1):69-76.

Botega DM. **Resistência à tração do titânio comercialmente puro soldado a laser em diferentes distancias e diâmetros**. [Tese Doutorado] Faculdade de Odontologia de Piracicaba, Universidade Estadual de Campinas – Área de Concentração Prótese Dental, 2005, 65f.

Byrne G. Soldering in prosthodontics--an overview, part I. **J Prosthodont**. 2011 Apr;20(3):233-43.

Cavalcante LAL, Ferreira VRN, Neves FD, Fernandes Neto AJ, Araújo CA, Nóbilo AA et al. Análise da resistência à flexão em braços suspensos de protocolos alternativos sobre implantes utilizando diferentes técnicas de soldagem. **Horizonte Científico** 2010;10:1-22.

Cavalcante LAL, Silva JPL, Novais VR, Neves FD, Fernandes Neto AJ, Araujo CA, Simamoto Júnior PC. Avaliação da resistência à flexão em ligas de Titânio (Ti6Al4V) soldadas com diferentes configurações pelo processo plasma. **Horizonte Científico** 2012: 1-22.

Cardoso LM. **Avaliação da resistência à flexão de liga de titânio submetida a soldagens laser e tig, visando a prótese dentária**. [dissertação] São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/IPEN;2007.

Chai T, Chou CK. Mechanical properties of laser-welded cast titanium joints under different conditions. **J Prosthet Dent**. 1998 Apr;79(4):477-83.

Chaves M, Vermilyea SG, Papazoglou E, Brantley WA. Effects of three soldering techniques on the strength of high-palladium alloy solder joints. **J Prosthet Dent**. 1998 Jun;79(6):677-84.

da Silveira-Júnior CD, Neves FD, Fenandes-Neto AJ, Prado CJ, Simamoto-Júnior PC. Influence of different tightening forces before laser welding to the implant/framework fit. **J Prosthodont** 2009 Jun;18(4):337-41.

Garcia A, Spim JA, dos Santos CA. **Ensaio dos Materiais**. Ed. Livros Técnicos e Científicos S.A.2000, 247p

Gordon TE, Smith DL. Laser welding of prostheses--an initial report **J Prosthet Dent**. 1970 Oct;24(4):472-6.

Hart CN, Wilson PR. Evaluation of welded titanium joints used with cantilevered implant-supported prostheses. **J Prosthet Dent**. 2006 Jul;96(1):25-32.

Lin MC, Lin SC, Wang YT, Hu SW, Lee TH, Chen LK, Huang HH. Fracture resistance of Nd:YAG laser-welded cast titanium joints with various clinical thicknesses and welding pulse energies. **Dent Mater J**. 2007 May;26(3):367-72.

Liu J, Watanabe I, Yoshida K, Atsuta M. Joint strength of laser-welded titanium. **Dent Mater**. 2002 Mar;18(2):143-8.

Neo TK, Chai J, Gilbert JL, Wozniak WT, Engelman MJ. Mechanical properties of titanium connectors. **Int J Prosthodont**. 1996 Jul-Aug;9(4):379-93.

Nomoto R, Takayama Y, Tsuchida F, Nakajima H. Non-destructive three-dimensional evaluation of pores at different welded joints and their effects on joints strength. **Dent Mater**. 2010 Dec;26(12):e246-52.

Núñez JM, Takahashi JM, Henriques GE, Nóbilo MA, Consani RL, Mesquita MF. Radiographic inspection of porosity in pure titanium dumbbell castings. **Gerodontology**. 2011 Sep;28(3):233-7.

Núñez-Pantoja JM, Takahashi JM, Nóbilo MA, Consani RL, Mesquita MF. Radiographic inspection of porosity in Ti-6Al-4V laser-welded joints. **Braz Oral Res**. 2011(a) Mar-Apr;25(2):103-8.

Núñez-Pantoja JM, Vaz LG, Nóbilo MA, Henriques GE, Mesquita MF. Effects of laser-weld joint opening size on fatigue strength of Ti-6Al-4V structures with several diameters. **J Oral Rehabil**. 2011(b) Mar;38(3):196-201.

Núñez-Pantoja JM, Vaz LG, Nóbilo MA, Mesquita MF. Fatigue performance of joints executed in pure titanium structures with several diameters. **Dent Mater J**. 2011(c) Nov 30(6 ):887-893.

Pantoja JM, Farina AP, Vaz LG, Consani RL, Nóbilo MA, Mesquita MF. Fatigue strength: effect of welding type and joint design executed in Ti-6Al-4V structures. **Gerodontology**. 2012 Jun;29(2):e1005-10.

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

- Roggensack M, Walter MH, Böning KW. Studies on laser- and plasma-welded titanium. **Dent Mater**. 1993 Mar;9(2):104-7.
- Shimakura M, Yamada S, Takeuchi M, Miura K, Ikeyama J. Influence of irradiation conditions on the deformation of pure titanium frames in laser welding. **Dent Mater J**. 2009 Mar;28(2):243-7.
- Silva J. **Avaliação da resistência flexural entre diferentes métodos de soldagem: chama direta Tig – laser** [dissertação de Mestrado] Faculdade de Odontologia de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo – USP/SP – área de concentração Reabilitação Oral, 2007,104f.
- Silva JP, Fernandes Neto AJ, Raposo LH, Novais VR, Araujo CA, Cavalcante L de A, Simamoto Júnior PC. Effect of plasma welding parameters on the flexural strength of ti-6al-4v alloy. **Braz Dent J**. 2012;23(6):686-91.
- Simamoto-Júnior PC, Novais VR, Nóbilo MAA, Barbosa GAS, Soares CJ, Neves FD. Influence of the soldering type in fitting prostheses on implants: a scanning electronic microscopy analysis. **Arquivos em Odontologia** 2008;44:23-29.
- Sjögren G, Andersson M, Bergman M. Laser welding of titanium in dentistry. **Acta Odontol Scand**. 1988 Aug;46(4):247-53.
- Srimaneepong V, Yoneyama T, Kobayashi E, Doi H, Hanawa T. Comparative study on torsional strength, ductility and fracture characteristics of laser-welded alpha+beta Ti-6Al-7Nb alloy, CP Titanium and Co-Cr alloy dental castings. **Dent Mater**. 2008 Jun;24(6):839-45.
- Takayama Y, Nomoto R, Nakajima H, Ohkubo C. Effects of argon gas flow rate on laser-welding. **Dent Mater J**. 2012;31(2):316-26.
- Taylor JC, Hondrum SO, Prasad A, Brodersen CA. Effects of joint configuration for the arc welding of cast Ti-6Al-4V alloy rods in argon. **J Prosthet Dent**. 1998 Mar;79(3):291-7.
- Tehini GE, Stein RS. Comparative analysis of two techniques for soldered connectors. **J Prosthet Dent** 1993 Jan;69(1):16-9.
- Tiossi R, Falcão-Filho H, Aguiar Júnior FA, Rodrigues RC, Mattos Mda G, Ribeiro RF. Modified section method for laser-welding of ill-fitting cp Ti and Ni-Cr alloy one-piece cast implant-supported frameworks. **J Oral Rehabil**. 2010 May 1;37(5):359-63.
- Tiossi R, Rodrigues RC, de Mattos Mda G, Ribeiro RF. Comparative analysis of the fit of 3-unit implant-supported frameworks cast in nickel-chromium and cobalt-chromium alloys and commercially pure titanium after casting, laser welding, and simulated porcelain firings. **Int J Prosthodont** 2008 Mar-Apr;21(2):121-3.
- Wang RR, Boyle AM. A simple method for inspection of porosity in titanium castings. **J Prosthet Dent**. 1993 Sep;70(3):275-6.

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

Watanabe I, Topham DS. Laser welding of cast titanium and dental alloys using argon shielding. **J Prosthodont** 2006 Mar-Apr;15(2):102-7.

Yamagishi T, Ito M, Fujimura Y. Mechanical properties of laser welds of titanium in dentistry by pulsed Nd:YAG laser apparatus. **J Prosthet Dent**. 1993 Sep;70(3):264-73.

Zavanelli RA, Guilherme AS, Pessanha-Henriques GE, de Arruda Nóbilo MA, Mesquita MF. Corrosion-fatigue of laser-repaired commercially pure titanium and Ti-6Al-4V alloy under different test environments. **J Oral Rehabil**. 2004 Oct;31(10):1029-34.

Zavanelli RA, Henriques GEP. Um simples método para a inspeção de porosidades nas fundições de titânio. **Rev ABO Nac** 2001; 9(2):165-6

Zupancic R, Legat A, Funduk N. Tensile strength and corrosion resistance of brazed and laser-welded cobalt-chromium alloy joints. **J Prosthet Dent** 2006 Oct;96(4):273-82.





## ANEXO 1 – TABELAS

**Tabela 1-** Valores das mensurações, médias e desvios padrão para cada espécime do grupo controle.

Número da amostra	Comprimento (mm)	Carga de fratura (N)	Deslocamento (mm)	Tensão máxima de flexão (MPa)
1	40,19	1478	4	2342,08
2	40,06	1413	3,74	2239,08
3	40,43	1417	4,03	2245,41
4	39,58	1437	3,79	2277,11
5	40,3	1448	4,3	2294,54
6	40,13	1464	4,47	2319,89
7	40,49	1461	4,67	2315,14
8	40,2	1441	4,48	2283,45
9	39,76	1506	4,86	2386,45
10	39,9	1519	4,76	2407,05
Média	40,10	1458,40	4,31	2311,02
DP	0,27	33,17	0,38	52,56

**Tabela 2-** Valores das mensurações, médias e desvios padrão para cada espécime do grupo LI.

Amostra	Comprimento (mm)	Carga de fratura (N)	Deslocamento (mm)	Tensão máxima de flexão (MPa)	Área total da junta (mm <sup>2</sup> )			Área de falha/porosidade (mm <sup>2</sup> )			Área média soldada por amostra (mm <sup>2</sup> )
					Face 1	Face 2	Média por amostra	Face 1	Face 2	Média por amostra	
1	39,90	490	0,4	776,46	6,00	6,06	6,03	2,80	2,78	2,79	3,24
2	39,82	365	0,2	578,38	6,45	6,49	6,47	3,37	3,49	3,43	3,04
3	39,82	817	0,6	1294,64	6,80	6,74	6,77	3,41	3,39	3,40	3,37
4	39,91	333	0,2	527,68	6,71	6,69	6,70	2,70	2,80	2,75	3,95
5	39,62	659	0,5	1044,27	6,89	6,98	6,93	3,40	3,49	3,44	3,49
6	39,80	886	0,6	1403,98	7,04	7,04	7,04	3,71	3,75	3,73	3,31
7	39,90	1085	0,9	1719,32	8,01	7,95	7,98	2,74	2,70	2,72	5,26
8	39,94	867	0,8	1294,64	5,93	5,92	5,92	2,61	2,59	2,60	3,32
9	39,90	741	0,7	1174,21	6,14	6,18	6,16	2,52	2,55	2,53	3,63
10	39,76	969	0,8	1535,50	7,08	7,03	7,05	3,74	3,87	3,80	3,25
MÉDIA	39,83	721,2	0,57	1134,90			6,70			3,12	3,58
DP	0,09	242,2	0,23	379,75			0,57			0,46	0,60

**Tabela 3-** Valores das mensurações, médias e desvios padrão para cada espécime do grupo LX30°.

Nº da amostra	Comprimento (mm)	Carga de fratura (N)	Deslocamento (mm)	Tensão máxima de flexão (MPa)	Área total da junta (mm²)			Área de falha/porosidade (mm²)			Área média soldada por amostra (mm²)
					Face 1	Face 2	Média por amostra	Face 1	Face 2	Média por amostra	
1	40,03	1002	0,9	1587,79	7,09	7,08	7,08	0,00	0,00	0,00	7,08
2	40,06	1375	1,6	2178,86	7,47	7,41	7,44	0,00	0,00	0,00	7,44
3	39,85	973	0,7	1541,84	7,33	7,30	7,21	0,22	0,33	0,27	6,94
4	39,90	983	0,8	1557,69	7,64	7,46	7,55	2,09	2,51	2,30	5,25
5	40,04	1332	2,1	2110,72	6,73	6,35	6,54	0,04	0,05	0,04	6,50
6	39,70	1190	1,1	1885,70	7,43	7,40	7,41	0,09	0,08	0,08	7,33
7	40,10	954	0,8	1511,73	7,25	7,29	7,27	0,00	0,00	0,00	7,27
8	40,06	1299	1,2	2058,43	7,20	7,22	7,21	0,06	0,01	0,03	7,18
9	39,96	1183	1,1	1874,61	7,17	7,12	7,14	0,33	0,35	0,34	6,80
10	39,94	1269	1,5	2010,89	7,05	7,00	7,02	0,10	0,11	0,10	6,92
MÉDIA	39,96	1156	1,18	1831,82			7,19			0,31	6,87
DP	0,11	155,55	0,41	246,49			0,27			0,67	0,60

**Tabela 4-** Valores das mensurações, médias e desvios padrão para cada espécime do grupo LX45°.

Nº da amostra	Comprimento (mm)	Carga de fratura (N)	Deslocamento (mm)	Tensão máxima de flexão (MPa)	Área total da junta (mm²)			Área de falha/porosidade (mm²)			Área média soldada por amostra (mm²)
					Face 1	Face 2	Média por amostra	Face 1	Face 2	Média por amostra	
1	39,90	855	0,72	1354,85	7,29	7,29	7,29	0,00	0,00	0,00	7,29
2	39,92	1167	1,25	1849,26	7,13	7,10	7,11	0,00	0,00	0,00	7,11
3	39,74	1350	2,26	2139,54	6,42	6,58	6,50	0,27	0,26	0,26	6,24
4	39,84	1086	1,15	1720,90	6,20	6,33	6,26	0,26	0,29	0,27	5,99
5	39,78	904	0,83	1432,50	6,53	6,58	6,55	0,17	0,24	0,20	6,35
6	39,73	1012	0,78	1603,64	6,72	6,82	6,77	0,17	0,18	0,17	6,60
7	39,83	1062	1,01	1682,87	6,57	6,58	6,57	0,00	0,00	0,00	6,57
8	39,96	1288	1,57	2041,00	6,97	6,90	6,93	0,00	0,00	0,00	6,93
9	39,88	637	0,54	1009,40	7,28	7,19	7,23	0,18	0,20	0,19	7,04
10	39,50	1195	0,96	1898,63	7,18	7,17	7,17	0,00	0,00	0,00	7,17
MÉDIA	39,80	1055,6	1,10	1673,25			6,84			0,11	6,72
DP	0,12	203,43	0,47	322,75			0,34			0,11	0,41

**Tabela 5-** Valores das mensurações, médias e desvios padrão para cada espécime do grupo TI.

Nº da amostra	Comprimento (mm)	Carga de fratura (N)	Deslocamento (mm)	Tensão máxima de flexão (MPa)	Área total da junta (mm <sup>2</sup> )			Área de falha/porosidade (mm <sup>2</sup> )			Área média soldada por amostra (mm <sup>2</sup> )
					Face 1	Face 2	Média por amostra	Face 1	Face 2	Média por amostra	
1	39,99	1126	0,85	1784,29	7,17	6,96	7,06	2,45	2,65	2,55	4,51
2	39,95	1140	0,87	1806,47	6,99	6,90	6,94	2,44	2,42	2,43	4,40
3	39,72	1428	1,49	2262,85	7,10	7,12	7,11	1,98	1,91	1,94	5,23
4	40,05	1138	0,87	1803,30	7,07	7,10	7,08	2,77	2,55	2,66	4,33
5	38,85	1135	0,99	1798,55	6,80	7,19	6,99	2,79	2,93	2,86	4,40
6	39,74	1109	0,84	1757,35	7,21	7,31	7,26	2,51	2,37	2,44	4,64
7	40,47	1353	1,21	2144,00	6,88	6,79	6,83	1,83	1,58	1,70	5,24
8	39,99	1065	0,86	1731,99	7,05	6,88	6,96	2,74	2,99	2,86	4,24
9	40,3	1209	1,00	1915,81	7,26	7,10	7,18	2,21	2,20	2,20	4,76
10	41,03	1299	1,11	2058,43	7,14	7,03	7,08	2,05	2,53	2,29	4,79
MÉDIA	40,00	1200,20	1,00	1.906,00			7,05			2,39	4,65
DP	0,53	113,54	0,19	175,07			0,14			0,37	0,33

**Tabela 6-** Valores das mensurações, médias e desvios padrão para cada espécime do grupo TX30°.

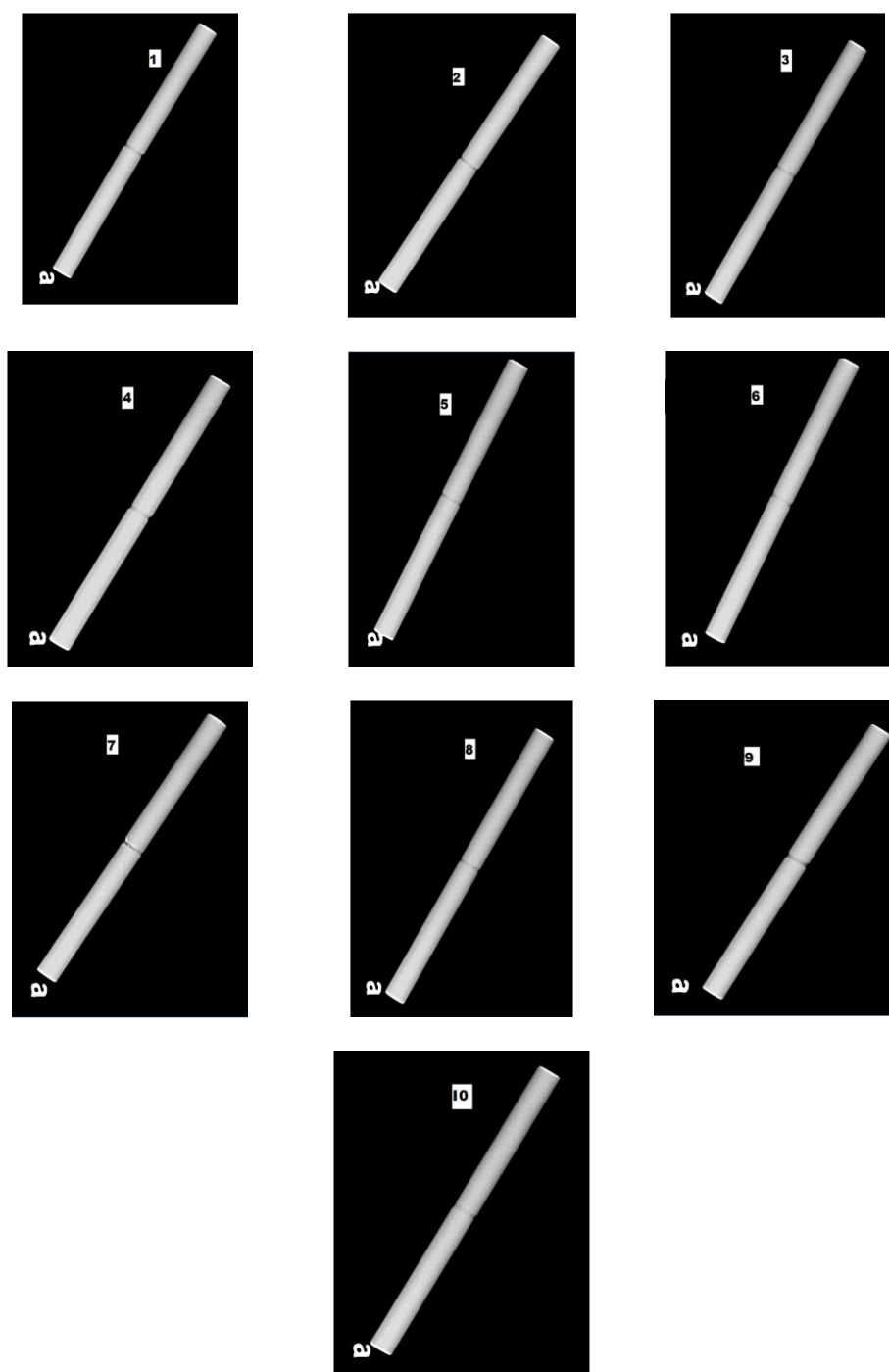
Nº da amostra	Comprimento (mm)	Carga de fratura (N)	Deslocamento (mm)	Tensão máxima de flexão (MPa)	Área total da junta (mm <sup>2</sup> )			Área de falha/porosidade (mm <sup>2</sup> )			Área média soldada por amostra (mm <sup>2</sup> )
					Face 1	Face 2	Média por amostra	Face 1	Face 2	Média por amostra	
1	40,25	1614	3,3	2562,34	6,62	6,62	6,62	0,00	0,00	0,00	6,62
2	40,01	1490	2,8	2361,09	6,51	6,64	6,57	0,00	0,00	0,00	6,57
3	40,15	1521	1,9	2410,22	6,81	6,69	6,75	0,94	1,16	1,05	5,70
4	39,88	1309	3,8	2074,27	6,75	6,86	6,80	0,00	0,00	0,00	6,80
5	39,50	1590	2,7	2519,56	7,01	6,62	6,81	0,61	0,56	0,585	6,23
6	40,00	1249	2,7	1979,20	6,88	6,74	6,81	1,18	1,24	1,21	5,60
7	39,85	1340	2,3	2123,40	6,45	6,77	6,61	0,84	0,82	0,83	5,78
8	39,96	1595	3,6	2527,48	6,65	6,60	6,62	0,00	0,00	0,00	6,62
9	39,86	1463	1,8	2318,31	7,14	6,88	7,01	1,52	1,48	1,50	5,51
10	39,83	1261	1,3	1998,21	6,14	6,05	6,09	1,12	1,14	1,13	4,96
MÉDIA	39,92	1443,2	2,62	2287,41			6,67			0,63	6,04
DP	0,19	134,89	0,76	214,36			0,25			0,56	0,58

**Tabela 7-** Valores das mensurações, médias e desvios padrão para cada espécime do grupo TX45°.

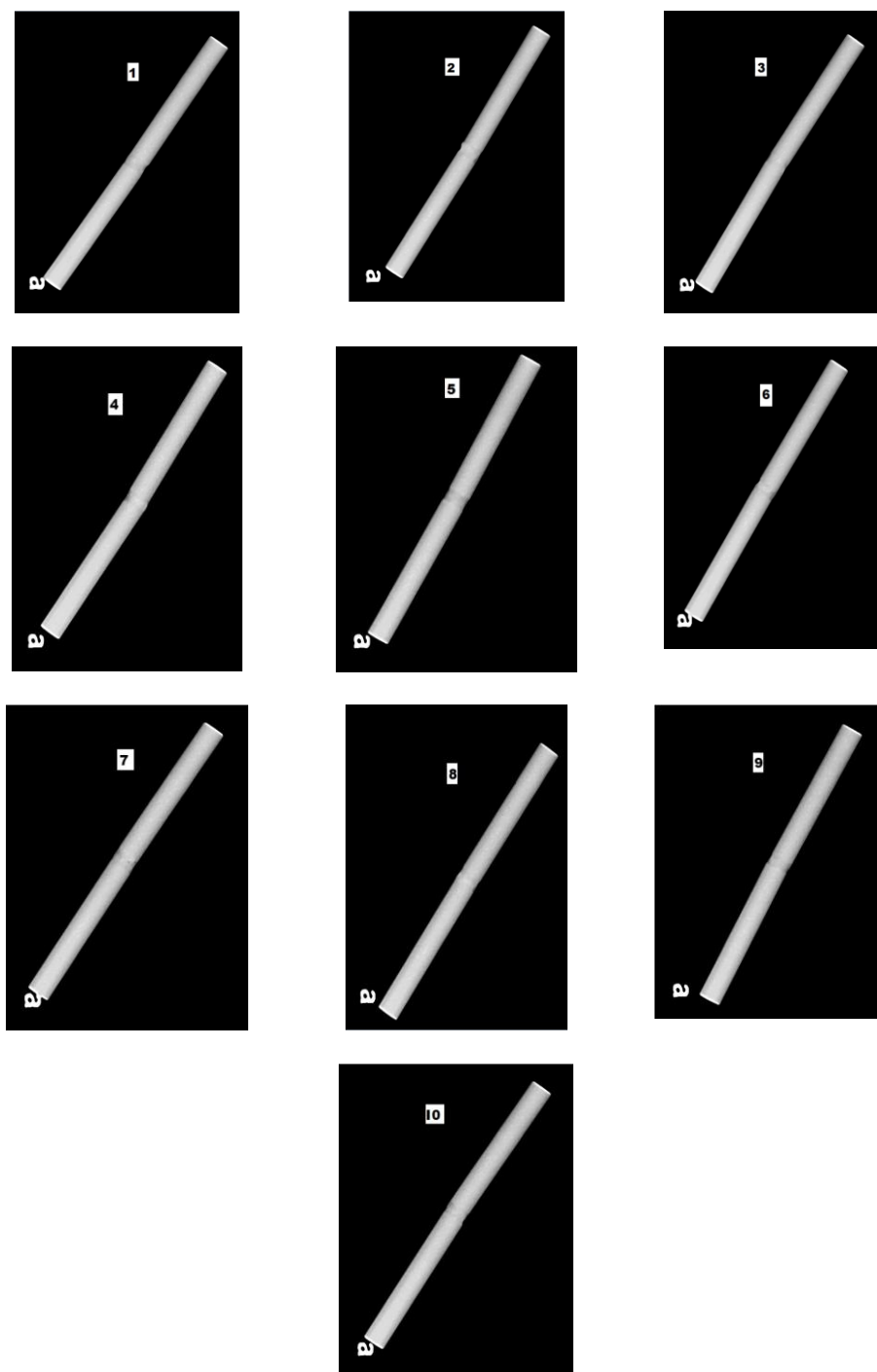
Nº da amostra	Comprimento (mm)	Carga de fratura (N)	Deslocamento (mm)	Tensão máxima de flexão (MPa)	Área total da junta (mm <sup>2</sup> )			Área de falha/porosidade (mm <sup>2</sup> )			Área média soldada por amostra (mm <sup>2</sup> )
					Face 1	Face 2	Média por amostra	Face 1	Face 2	Média por amostra	
1	39,99	1334	1,10	2113,89	7,58	7,50	7,54	0	0	0	7,54
2	38,82	1622	3,10	2570,26	7,01	6,98	6,99	0,73	0,88	0,80	6,19
3	39,96	1406	1,80	2229,57	7,50	7,59	7,54	0,52	0,51	0,51	7,03
4	40,11	1622	3,00	2570,26	8,10	8,06	8,08	0,46	0,87	0,66	7,41
5	40,01	1497	2,10	2372,18	7,09	7,18	7,13	0,45	0,56	0,50	6,63
6	39,09	1357	1,40	2150,34	7,22	7,33	7,27	0,08	0,37	0,22	7,05
7	40,02	1518	1,80	2407,05	7,65	7,65	7,65	0,56	0,47	0,51	7,13
8	39,90	1357	1,40	2151,92	7,35	7,30	7,32	0,63	0,55	0,59	6,73
9	39,85	1355	2,10	2148,75	7,16	7,17	7,19	0,69	0,71	0,70	6,49
10	39,83	1431	1,70	2269,18	6,60	6,74	6,67	0,53	0,46	0,49	6,17
MÉDIA	39,75	1449,90	1,90	2298,34			7,33			0,50	6,83
DP	0,41	103,96	0,62	164,46			0,37			0,23	0,45

## ANEXO 2 – FIGURAS

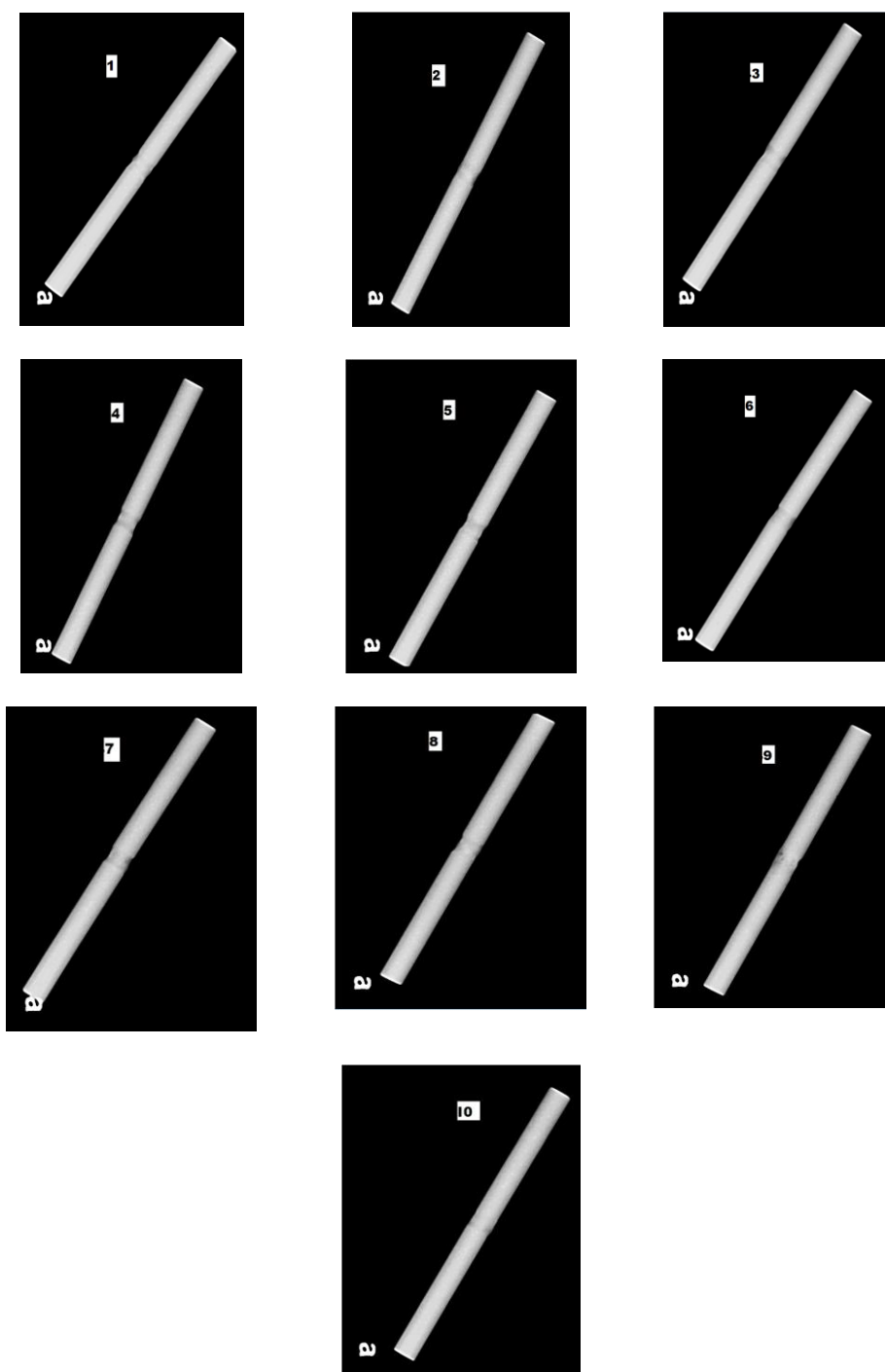
As Figuras 1 a 3 mostram as imagens radiográficas obtidas para cada espécime dos grupos soldados à Laser.



**Figura 1-** Imagens radiográficas digitais obtidas dos espécimes do Grupo LI

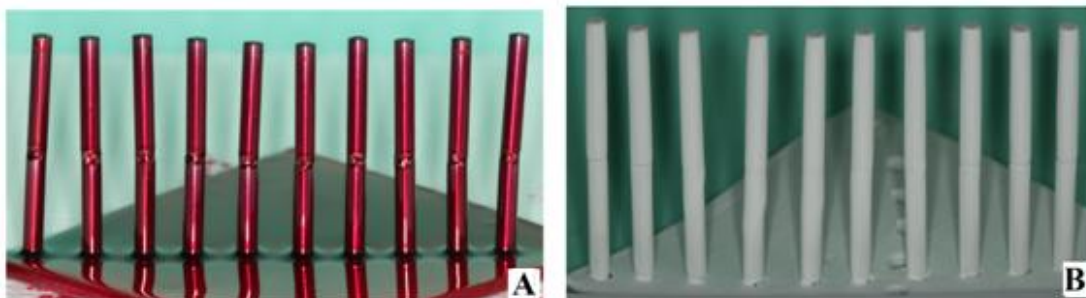


**Figura 2-** Imagens radiográficas digitais obtidas dos espécimes do Grupo LX30°

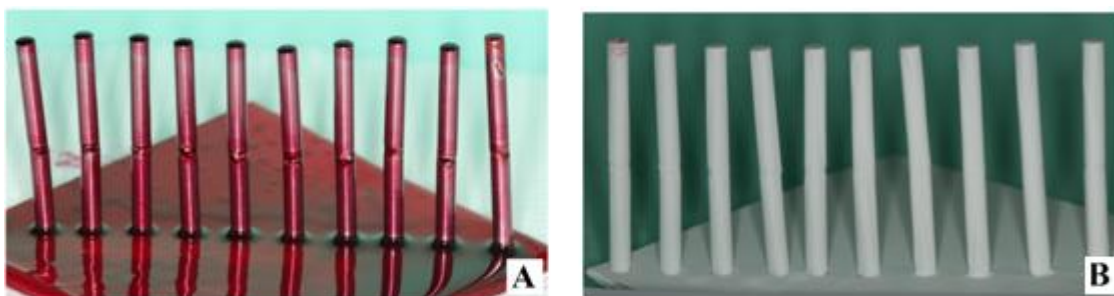


**Figura 3-** Imagens radiográficas digitais obtidas dos espécimes do Grupo LX45°

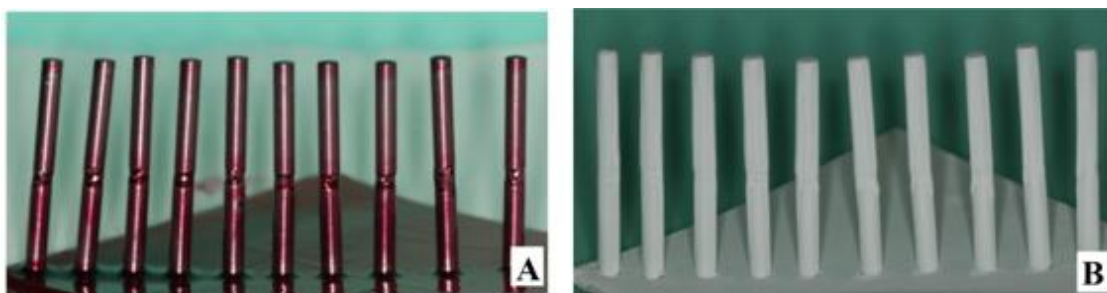
As Figuras 4 a 6 mostram as imagens do processo de avaliação de defeitos superficiais dos espécimes do grupo Laser.



**Figura 4-** Avaliação com líquidos penetrantes para o grupo LI. A) líquido penetrante aplicado; B) líquido revelador aplicado.



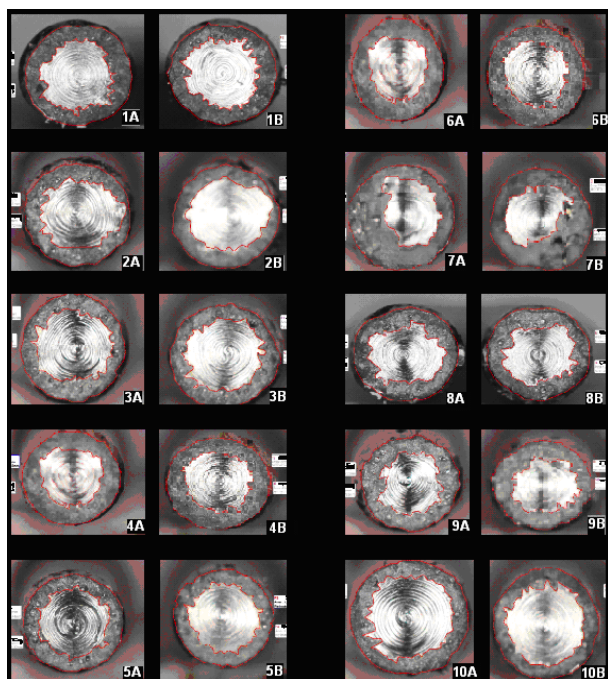
**Figura 5-** Avaliação com líquidos penetrantes para o grupo LX30°. A) Líquido penetrante aplicado; B) Líquido revelador aplicado.



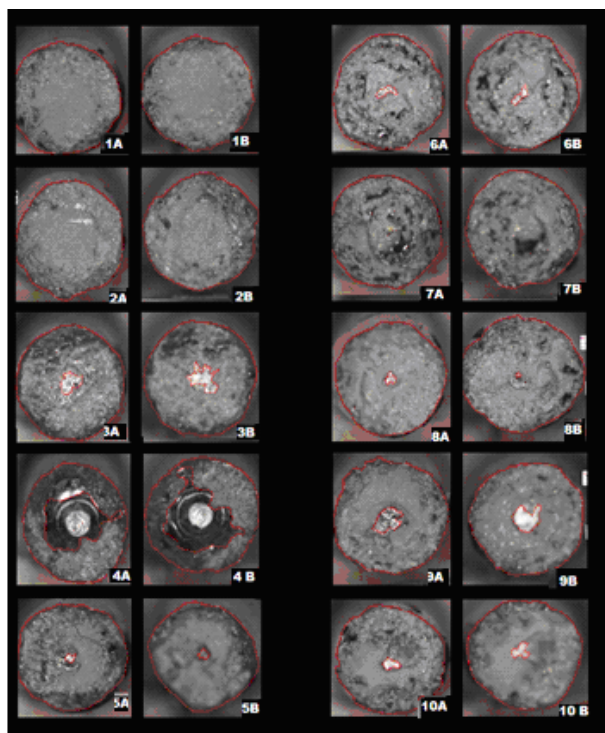
**Figura 6-** Avaliação com líquidos penetrantes para o grupo LX45°. A) Líquido penetrante aplicado; B) líquido revelador aplicado.

As Figuras 7 a 9 mostram as imagens das superfícies de fratura obtidas para cada espécime dos grupos soldados à Laser.

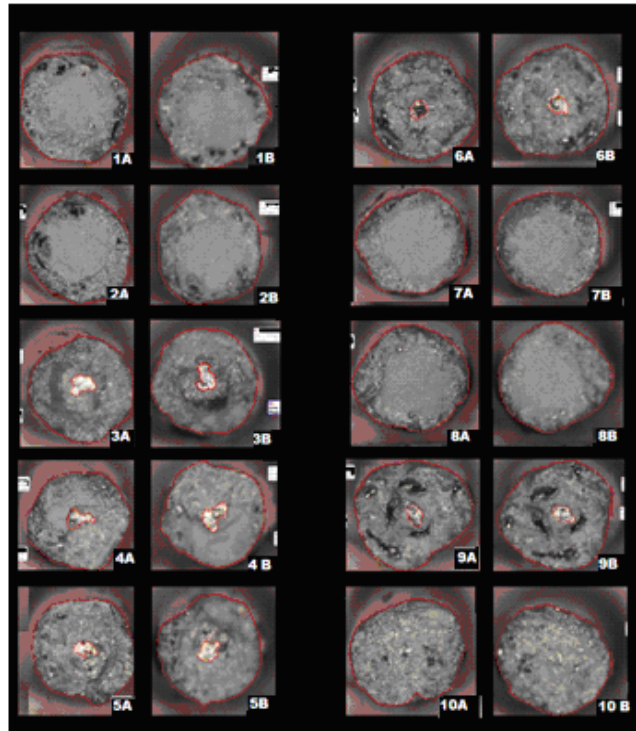




**Figura 7-** Imagens digitais obtidas dos espécimes do Grupo LI



**Figura 8-** Imagens digitais obtidas dos espécimes do Grupo LX30°.

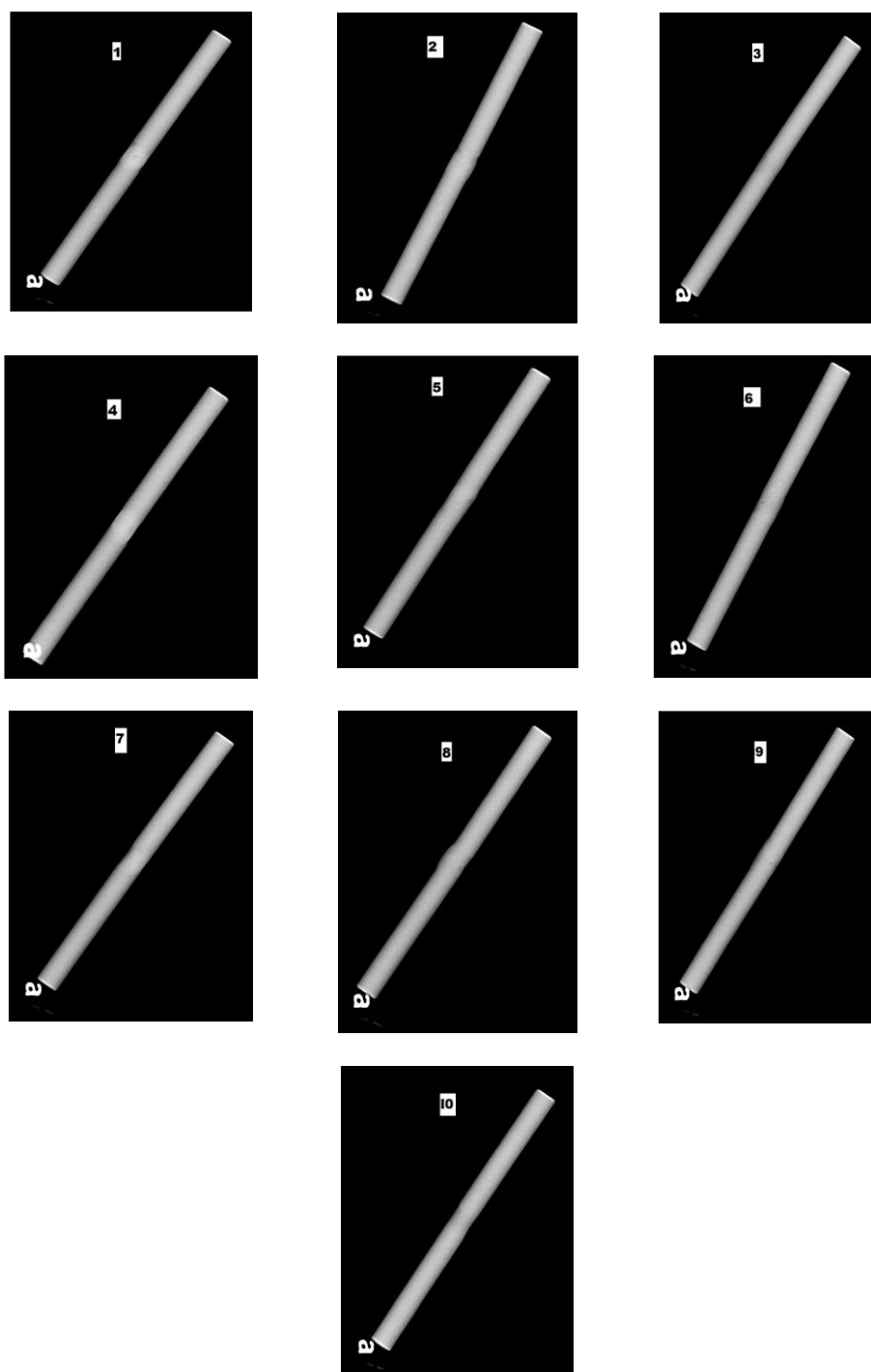


**Figura 9-** Imagens digitais obtidas dos espécimes do Grupo LX45°.

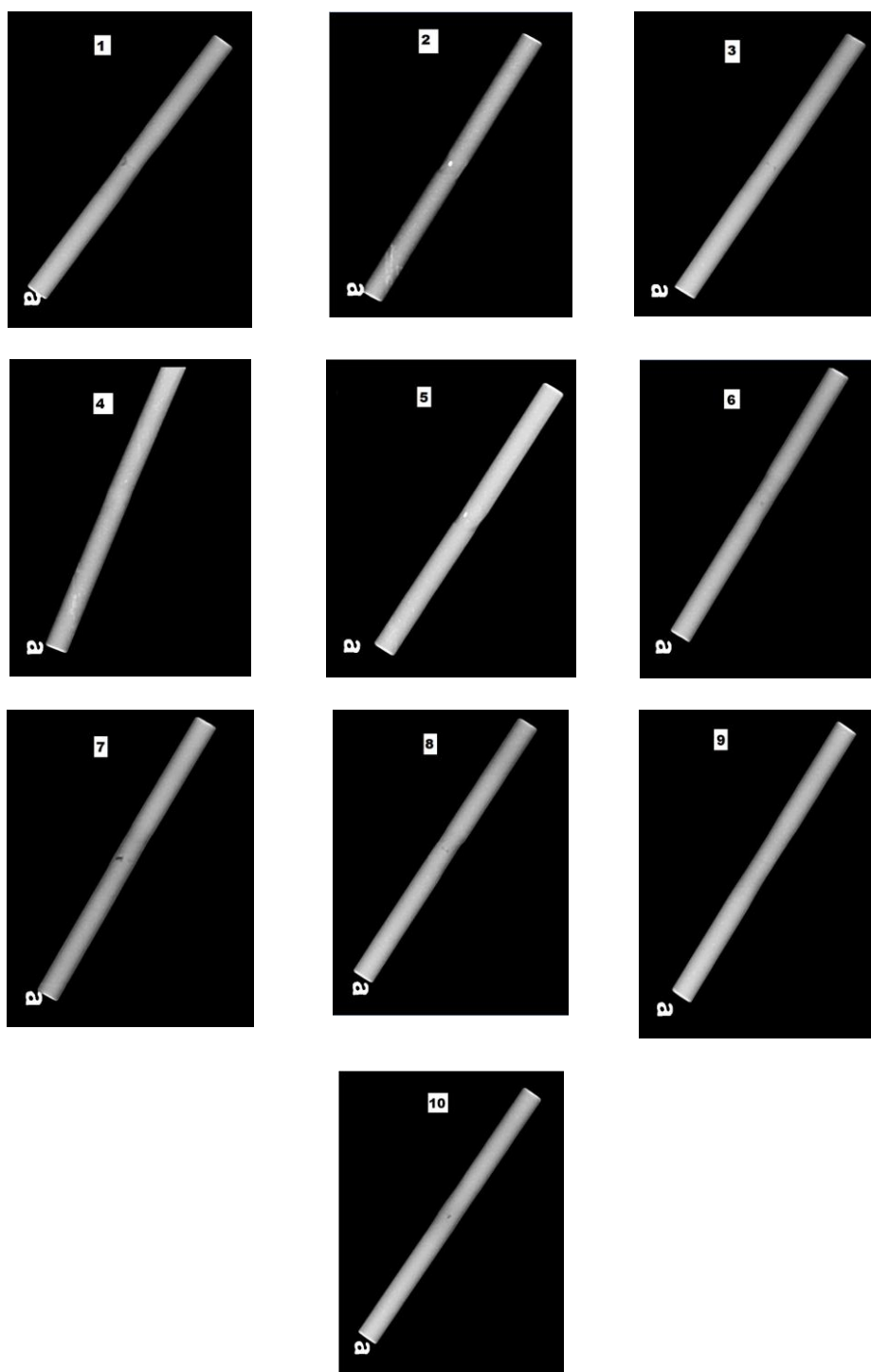
As figuras 10 a 12 mostram as imagem radiográficas obtidas para cada espécime dos grupos soldados por meio do processo TIG.



**Figura 10-** Imagens radiográficas obtidas dos espécimes do Grupo TI.

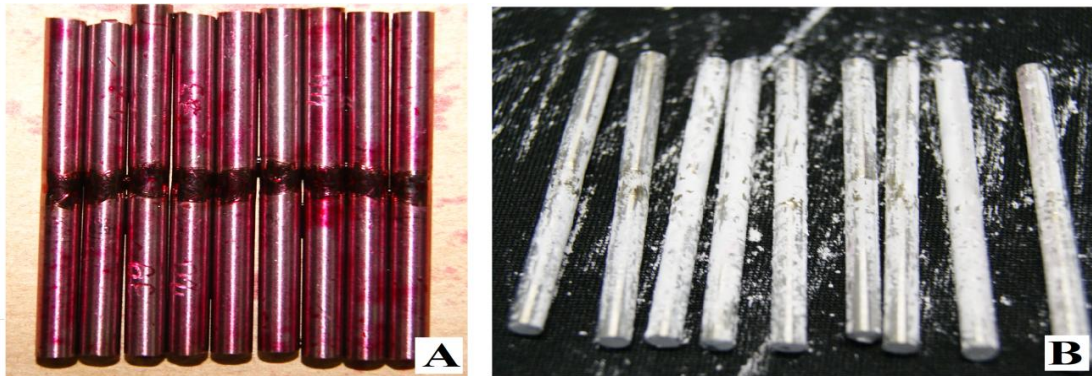


**Figura 11-** Imagens radiográficas digitais obtidas dos espécimes do Grupo TX30°.

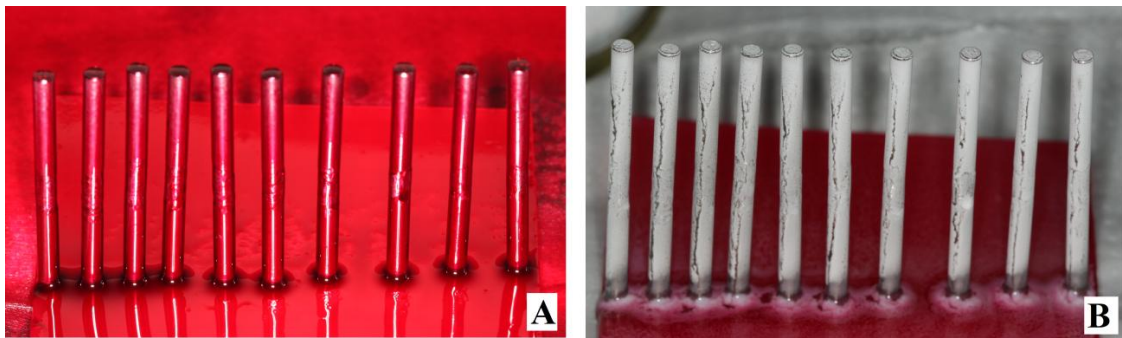


**Figura 12-** Imagens radiográficas digitais obtidas dos espécimes do Grupo TX45°.

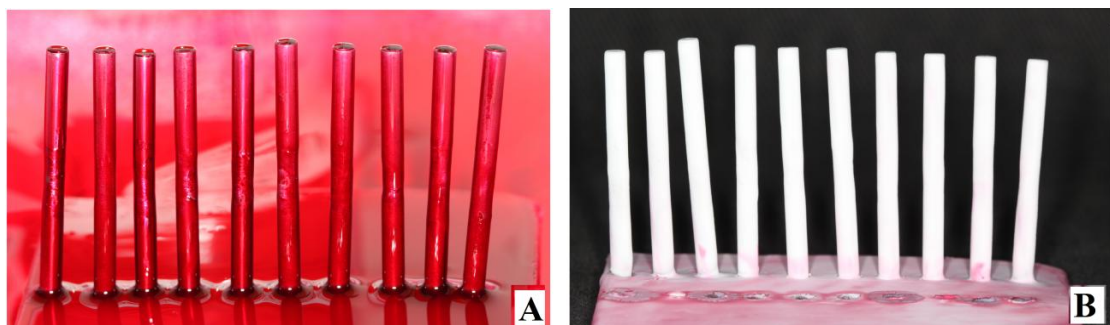
As Figuras 13 a 15 mostram as imagens da avaliação de defeitos superficiais por meio de líquidos penetrantes para cada grupo experimental soldado a TIG.



**Figura 13-** Avaliação com líquidos penetrantes para o grupo TI. A) líquido penetrante aplicado; B) líquido revelador aplicado.



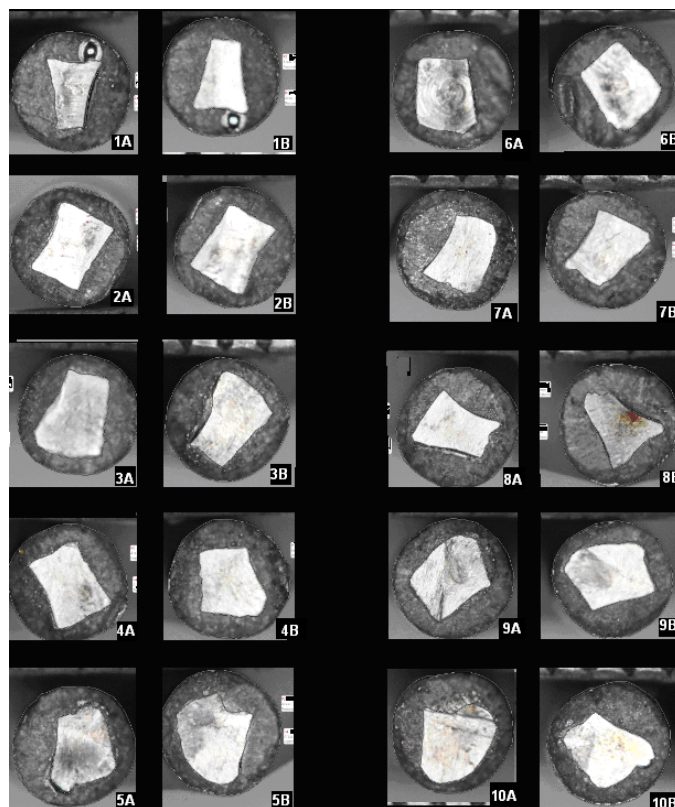
**Figura 14-** Avaliação com líquidos penetrantes para o grupo TX30°. A) líquido penetrante aplicado; B) líquido revelador aplicado.



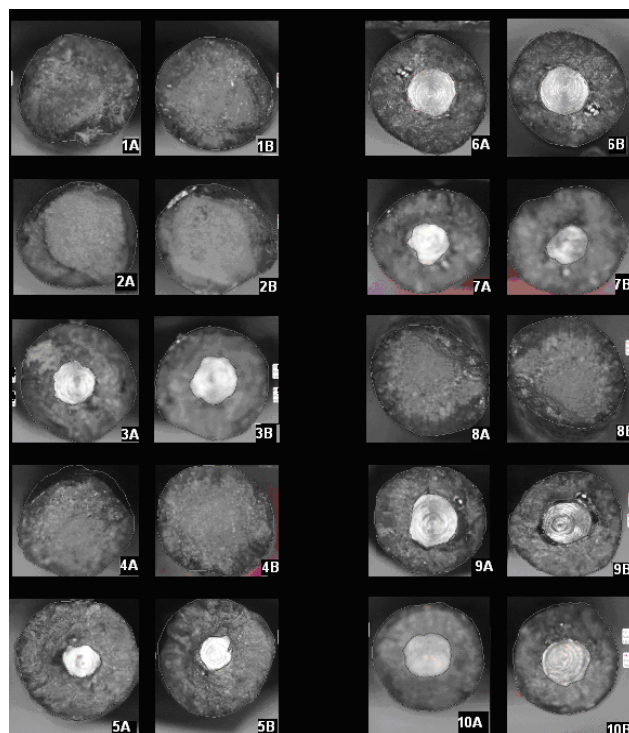
**Figura 15-** Avaliação com líquidos penetrantes para o grupo TX45°. A) líquido penetrante aplicado; B) líquido revelador aplicado.



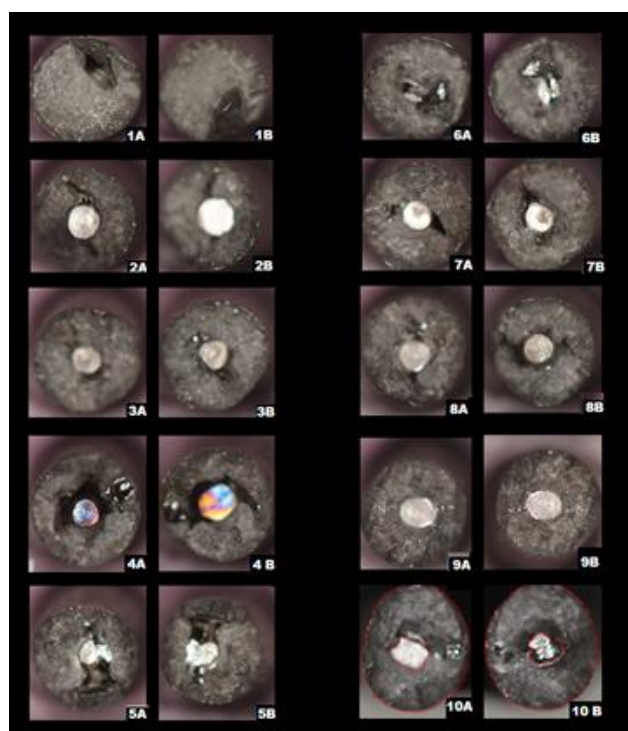
As Figuras 16 a 18 mostram as imagens das superfícies de fratura obtidas por meio de MEV do grupo TIG.



**Figura 16-** Imagens digitais obtidas dos espécimes do Grupo TI.



**Figura 17-** Imagens digitais obtidas dos espécimes do Grupo TX30°.



**Figura 18-** Imagens digitais para os espécimes do Grupo TX45°.



## ANEXO 3 – ANÁLISE ESTATÍSTICA

### Análise Estatística para os dados de Tensão máxima de flexão

#### Two Way Analysis of Variance

terça-feira, janeiro 22, 2013, 21:11:54

**Data source:** Data 1 in Notebook1

Balanced Design

Dependent Variable: tensão máxima de flexão

**Normality Test:** Passed (P = 0,790)

**Equal Variance Test:** Passed (P = 0,149)

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Solda	1	5716901,8	5716901,8	74,8	<0,001
Junção	2	3415932,9	1707966,5	22,3	<0,001
Solda x Junção	2	249786,0	124893,2	1,7	0,205
Residual	54	4127947,7	76443,5		
Total	59	13510568,4	228992,7		

The difference in the mean values among the different levels of Solda is greater than would be expected by chance after allowing for effects of differences in Junção. There is a statistically significant difference (P = <0,001). To isolate which group(s) differ from the others use a multiple comparison procedure.

The difference in the mean values among the different levels of Junção is greater than would be expected by chance after allowing for effects of differences in Solda. There is a statistically significant difference (P = <0,001). To isolate which group(s) differ from the others use a multiple comparison procedure.

The effect of different levels of Solda does not depend on what level of Junção is present. There is not a statistically significant interaction between Solda and Junção. (P = 0,205)

Power of performed test with alpha = 0,0500: for Solda : 1,000

Power of performed test with alpha = 0,0500: for Junção : 1,000

Power of performed test with alpha = 0,0500: for Solda x Junção : 0,145

Least square means for Solda :

**Group Mean**

Laser1546,664

TIG2164,019

Std Err of LS Mean = 50,479

Least square means for Junção :

**Group Mean**

0° 1520,606

30° 2059,620

45° 1985,799

Std Err of LS Mean = 61,824

Least square means for Solda x Junção :

**Group Mean**

Laser x 0° 1134,908

Laser x 30° 1831,826

Laser x 45° 1673,259

TIG x 0° 1906,304

TIG x 30° 2287,413

TIG x 45° 2298,340

Std Err of LS Mean = 87,432

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Tukey Test):

Comparisons for factor: **Solda**

Comparison	Diff of Means	p	q	P	P<0,050
TIG vs. Laser	617,355	212,230	<0,001		Yes

Comparisons for factor: **Junção**

Comparison	Diff of Means	p	q	P	P<0,050
30° vs. 0°	539,014	38,719		<0,001	Yes
30° vs. 45°	73,820	31,194		0,677	No
45° vs. 0°	465,193	3	7,525	<0,001	Yes

## Análise estatística para os dados de área soldada

### Two Way Analysis of Variance

terça-feira, janeiro 22, 2013, 21:14:25

**Data source:** Data 1 in Notebook1

Balanced Design

Dependent Variable: área soldada

**Normality Test:** Passed (P = 0,288)

**Equal Variance Test:** Passed (P = 0,767)

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Solda	1	0,2	0,1	0,7	0,408

Junção	2	84,4	42,2	145,9	<0,001
Solda x Junção	2	9,0	4,5	15,6	<0,001
Residual	54	15,6	0,3		
Total	59	109,2	1,9		

Main effects cannot be properly interpreted if significant interaction is determined. This is because the size of a factor's effect depends upon the level of the other factor.

The effect of different levels of Solda depends on what level of Junção is present. There is a statistically significant interaction between Solda and Junção. ( $P = <0,001$ )

Power of performed test with  $\alpha = 0,0500$ : for Solda : 0,0500

Power of performed test with  $\alpha = 0,0500$ : for Junção : 1,000

Power of performed test with  $\alpha = 0,0500$ : for Solda x Junção : 0,999

Least square means for Solda :

**Group Mean**

Laser 5,729

TIG 5,845

Std Err of LS Mean = 0,0982

Least square means for Junção :

**Group Mean**

0° 4,120

30° 6,456

45° 6,784

Std Err of LS Mean = 0,120

Least square means for Solda x Junção :

**Group Mean**

Laser x 0° 3,587

Laser x 30° 6,871

Laser x 45° 6,729

TIG x 0° 4,654

TIG x 30° 6,040

TIG x 45° 6,839

Std Err of LS Mean = 0,170

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Tukey Test):

Comparisons for factor: **Junção within Laser**

Comparison	Diff of Means	p	q	P	P<0,05
30° vs. 0°	3,284		319,319	<0,001	Yes
30° vs. 45°	0,142		30,835	0,826	No
45° vs. 0°	3,143		318,484	<0,001	Yes

Comparisons for factor: **Junção within TIG**

<b>Comparison</b>	<b>Diff of Means</b>	<b>p</b>	<b>q</b>	<b>P</b>	<b>P&lt;0,05</b>
45° vs. 0°	2,185	312,855	<0,001		Yes
45° vs. 30°	0,799	34,700	0,005		Yes
30° vs. 0°	1,386	38,155	<0,001		Yes

Comparisons for factor: **Solda within 0°**

<b>Comparison</b>	<b>Diff of Means</b>	<b>p</b>	<b>q</b>	<b>P</b>	<b>P&lt;0,05</b>
TIG vs. Laser	1,067	26,279	<0,001		Yes

Comparisons for factor: **Solda within 30°**

<b>Comparison</b>	<b>Diff of Means</b>	<b>p</b>	<b>q</b>	<b>P</b>	<b>P&lt;0,05</b>
Laser vs. TIG	0,830	24,885	0,001		Yes

Comparisons for factor: **Solda within 45°**

<b>Comparison</b>	<b>Diff of Means</b>	<b>p</b>	<b>q</b>	<b>P</b>	<b>P&lt;0,05</b>
TIG vs. Laser	0,110	20,650	0,648		No