

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANDRÉ MATHEUS AGNER
CAIO JARDEVESKI ALVES

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DA SOLDAGEM POR FRICÇÃO
DE BARRAS CILÍNDRICAS DE TITÂNIO EM UM TORNO
CONVENCIONAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(Tcc 2)

CURITIBA
2019

ANDRÉ MATHEUS AGNER
CAIO JARDEVESKI ALVES

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DA SOLDAGEM POR FRICÇÃO
DE BARRAS CILÍNDRICAS DE TITÂNIO EM UM TORNO
CONVENCIONAL**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Tcc 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr Luciano Zart Olanyk

Co-Orientador: Prof. Dr Carlos Henrique da Silva

CURITIBA

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "Estudo da viabilidade técnica da soldagem por fricção de barras cilíndricas de titânio em um torno convencional", realizado pelo aluno(s) André Matheus Agner e Caio Jardeveski Alves, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr., Luciano Zart Olanyk
DAMEC, UTFPR
Orientador

Prof. Dr., Samuel Soares Ansay
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Prof. Dr., Milton Luiz Polli
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 28 de novembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer primeiramente aos nossos familiares, que nos deram todo o apoio necessário para chegar até esta etapa final do curso. Aos professores orientadores que sempre estiveram dispostos a nos ajudar e com sua experiência puderam acrescentar muito a este trabalho. E por fim a todos que de alguma maneira nos apoiaram, durante esses longos anos de bacharelado.

RESUMO

AGNER, André; ALVES, Caio. Estudo da viabilidade técnica da soldagem por fricção de barras cilíndricas de titânio em um torno convencional. 56 f. Trabalho de conclusão de curso - Tcc2, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

A soldagem por fricção convencional, inventada em 1939 pela união soviética, vem sendo aplicada em diversas aéreas e é uma importante ferramenta quando se deseja soldar corpos a temperaturas menores que a de fusão. O trabalho em questão baseou-se em aplicar essa técnica em um torno convencional adaptado, utilizando como matéria prima a liga de titânio Ti-Al-4V. A matéria prima importada foi fornecida por uma empresa parceira, do ramo de equipamentos médicos, que busca uma maneira de estabelecer uma junta permanente desse material biocompatível. Baseando-se em literatura técnica, o estudo aborda a metodologia de aplicação da solda, abrangendo desde as forças aplicadas, rotação do torno, *set up* utilizado e particularidades do processo. Para definir a rotação de 2500 rpm utilizada nos testes finais, soldas preliminares realizadas em diferentes rotações foram submetidas a ensaios tração e seus resultados foram comparados. Com o processo e parâmetros definidos, sete corpos de prova soldados foram analisados quanto a resistência a tração, metalografia e microdureza. Apesar de certa discordância quanto a coaxialidade das peças, em geral, as soldas apresentaram resultados satisfatórios, suportando em média uma tração de 908 Mpa e apresentando um aumento de 100 HVN na região central da solda, indo de acordo com estudos estrangeiros realizados com equipamento específico de aplicação da soldagem por fricção em titânio. Como o objetivo principal era unir peças cilíndricas através da soldagem por fricção em titânio grau 5, aumentando sua resistência mecânica, consideramos que o trabalho teve êxito em seu propósito.

Palavras chave: Titânio grau 5 (Ti-Al-4V), soldagem por fricção rotativa, soldabilidade do titânio.

ABSTRACT

AGNER, André; ALVES, Caio. Study of the technical feasibility of friction welding of titanium cylindrical bars in a conventional lathe. 56 f. Undergraduate Thesis, Mechanical Engineering, Academic Department of Mechanical, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Conventional friction welding, invented in 1939 by the Soviet Union, has been applied in various scopes and is an important tool when it is desired to weld bodies at temperatures below melting. The work in question was based on applying this technique in a conventional adapted lathe, using Ti-Al-4V titanium alloy as raw material. The imported raw material was supplied by a medical equipment partner company that is looking for a way to establish a permanent joint of this biocompatible material. Based on technical literature, the study addresses the welding application methodology, covering from applied forces, lathe rotation, *set up* used and process particularities. To define the rotation of 2500 rpm used in the final tests, preliminary welds performed at different rotations were submitted to tensile tests and their results were compared. With the process and parameters defined, seven welded specimens were analyzed for tensile strength, metallography and microhardness. Despite some disagreement as to the coaxiality of the parts, in general, the welds presented satisfactory results, supporting on average a traction of 908 Mpa and presenting a 100 HVN increase in the central region of the weld, according to foreign studies with specific equipment application of titanium friction welding. As the main objective was to join cylindrical parts through grade 5 titanium friction welding, increasing their mechanical strength, we consider that the work was successful in its purpose.

Keywords: Grade 5 titanium (Ti-Al-4V), rotary friction welding, titanium weldability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de estrutura cristalina do titânio.....	16
Figura 2 - Funcionamento da RFW convencional	18
Figura 3 - Variação dos parâmetros da soldagem RFW convencional em função do tempo	19
Figura 4 - Variação dos parâmetros da soldagem RFW inercial em função do tempo	20
Figura 5 - Variação de parâmetros em uma soldagem RFW inercial.....	21
Figura 6 - Exemplo de <i>set up</i> de Soldagem de fricção convencional	23
Figura 7 - Exemplo de <i>set up</i> de soldagem de fricção convencional.....	24
Figura 8 - Tipos de falha na soldagem por fricção de tubos - (a) Temperatura não suficiente, (b) Excessiva, (c) Forjamento incompleto e (d) Plastificação insuficiente	25
Figura 9 - Descontinuidades no centro de solda, seta em direção a maior deformação axial	25
Figura 10 - Junta soldada por RFW convencional.....	26
Figura 11 - Junta soldada por RFW convencional 1500 rpm	27
Figura 12 - Junta soldada por RFW convencional 1500 rpm	27
Figura 13 - Junta soldada por RFW convencional 1500 rpm	28
Figura 14 – Ensaio de tração realizado por Avinash et al (2007).....	29
Figura 15 - Resultado dos ensaios de tração realizados por Palanivel et al (2017)	29
Figura 16 – Resultado do ensaio de tração de 2200 rpm realizado por Palanivel et al (2017)	30
Figura17 – Ensaio de tração realizado por Avinash et al (2007)	31
Figura 18 – Resultado do ensaio de tração de 2200 rpm realizado por Palanivel et al (2017)	31
Figura 19 – Esquema metodológico dos procedimentos usados nesta pesquisa.	31
Figura 20 - Torno ROMI ID-20.....	32
Figura 21 - Demonstração das possíveis opções de fixação das peças “A” e “B”.	33
Figura 22 - Demonstração dos possíveis locais de fixação.....	34

Figura 23 - Segundo <i>set up</i> com a inclusão da luneta e a aproximação do contraponto junto a castanha.	35
Figura 24 - Segundo <i>set up</i>	35
Figura 25 - Terceiro <i>set up</i>	36
Figura 26 - Eixo estriado que controla o avanço do carro	37
Figura 27 - <i>set up</i> número quatro	38
Figura 28 – Imagens fotográficas da sequencia de aplicação da força fricção	39
Figura 29 – Variação dos parâmetros em função do tempo.....	40
Figura 30 – Fluxograma dos processos de realização da soldagem por fricção..	40
Figura 31 – Vista lateral do ensaio para medição da força axial	41
Figura 32 – Vista superior do ensaio para medição da força axial	42
Figura 33 - Peças embutidas.....	43
Figura 34 - Esquema explicativo para o entendimento das direções de medição de dureza	44
Figura 35 – Região da solda amostras definitivas.....	47
Figura 36 – Limite de resistência a tração (ou tensão última) calculada das amostras 1 a 8.....	48
Figura 37 – Curva Tensão x Deformação De todas as amostras.....	49
Figura 38 – Fratura das amostras 1, 2 e 8 (não soldada)	50
Figura 39-a) Região da interface solda - metal base 200X. b) Região do centro de solda 500X. c) Região do metal base afastada da solda 500X.....	51
Figura 40- Dureza no sentido longitudinal (eixo x), amostra 7	52
Figura 41- Dureza medida radialmente (eixo y)	53
Figura 42- Microdureza medida longitudinalmente peça 5 e 6.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de titânio e suas composições.....	17
Tabela 2 – Composição Ti-6Al-4V.....	17
Tabela 3 – Resultados preliminares ensaio de tração.....	47
Tabela 4 – Comprimentos iniciais e finais em mm	49

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ASM	Sociedade Americana de Metais
CCC	Cubico de corpo centrado
CP	Comercialmente puro
EUA	Estados Unidos da América
FIG.	Figura
HC	Hazagonal compacto
MIG	Metal Inert Gas
RFW	Rotary friction welding
TCC	Trabalho de conclusão de curso
TI-AL-4V	Liga de titânio grau 5
TIG	Tungsten Inert Gas
ZT	Zona de transição
ZTA	Zona termicamente afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 CONTEXTO DO TEMA	12
1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	12
1.3 OBJETIVO	13
1.4 JUSTIFICATIVA	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 TITÂNIO E SUAS LIGAS.....	14
2.2 SOLDAGEM POR FRICÇÃO	17
2.2.1 Características Gerais da Soldagem por Fricção	17
2.2.2 Parâmetros de Soldagem Por Fricção.....	18
2.2.3 Exemplo de adaptação de torno	22
2.2.4 Qualidade da solda	23
2.2.5 Metalografia das juntas soldadas da literatura	25
2.2.6 Ensaio de tração das juntas soldadas da literatura	27
2.2.7 Ensaio de dureza das juntas soldadas da literatura	29
3 METODOLOGIA.....	31
3.1 SET UPS TESTADOS PARA A REALIZAÇÃO DOS TESTES	32
3.1.1 Primeiro <i>Set up</i>	33
3.1.2 Segundo <i>set up</i>	34
3.1.3 Terceiro <i>set up</i>	35
3.1.4 Quarto <i>set up</i>	37
3.2 METODOLOGIA DESENVOLVIDA	38
3.3 ENSAIOS DE SOLDAGEM PRELIMINARES	41
3.4 ESTIMATIVA DAS FORÇAS AXIAIS.....	41
3.5 ENSAIO DE TRAÇÃO	42
3.6 MEDIÇÃO DE DUREZA	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO DAS AMOSTRAS PRELIMINARES	45
4.2 AMOSTRAS DEFINITIVAS	46
4.3 ENSAIOS DE TRAÇÃO AMOSTRAS DEFINITIVAS	47
4.3.1 Imagens metalográficas	49
4.3.2 Ensaio de dureza	51
5 CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do tema

Devido a algumas propriedades especiais, como biocompatibilidade e relação peso/resistência mecânica, o titânio é utilizado em inúmeras aplicações diferentes, desde asas de aviões a próteses médicas. O que torna imprescindível saber como esse material de alto custo se comporta em diferentes processos de soldagem.

Existe uma gama de opções para se fabricar juntas soldadas desse elemento, tanto por processos de fusão, como por processos de estado sólido. A solda por resistência, feixe de elétrons, solda MIG, TIG, Laser, são algumas das opções possíveis. Há, contudo, precauções que devem ser tomadas em algumas ocasiões. Se houver formação de poça de fusão em temperaturas elevadas, existe a necessidade de evitar o contato do titânio com o ar e alguns de seus componentes, em especial o oxigênio, devido à alta reatividade desse metal. Logo, para obter juntas soldadas com processos de fusão, o ideal é realizar a solda com a injeção localizada de gases inertes, ou ainda, efetuar esse processo no interior de câmaras a vácuo ou de atmosfera controlada evitando, dessa maneira, a possível formação de trincas, oxidação e porosidades indesejadas.

É importante ressaltar que os processos de fusão que exigem o controle da atmosfera localizada são os métodos mais empregados no âmbito industrial para a solda do titânio. Os processos de soldagem que não são convencionais seriam: laser, resistência elétrica, feixe de elétrons e soldagem por fricção (LEYENS e PETERS, 2003).

1.2 Caracterização do problema

Uma determinada empresa do ramo de instrumentos médicos, encontrou um problema de desperdício de matéria prima, durante o processo de fabricação de um determinado produto. Devido ao fato do componente ser fabricado em titânio, um material custoso, e feito em bloco único (um produto sem juntas ou soldas), faz com que o custo seja elevado. Uma proposta de alteração em um dos processos sugere um possível acoplamento de duas peças de titânio, adicionando uma etapa de junção, que, por consequência, reduziria a quantidade de titânio perdido durante a usinagem.

A vantagem dessa alteração implicaria em uma possível redução de custo na fabricação, em consequência da economia de matéria prima.

1.3 Objetivo

O intuito desse trabalho é validar uma proposta de soldagem por fricção da liga de titânio grau 5 (Ti-Al-4V), em um torno convencional ROMI – ID 20, relacionando os parâmetros de soldagem por fricção com os parâmetros de operação do torno como rotação e avanço. As juntas soldadas serão analisadas tecnicamente quanto a metalografia, resistência mecânica. O processo de soldagem proposto também será validado quanto a sua replicabilidade.

Para que a parte experimental possa ser executada, primeiramente será necessário o estudo e embasamento teórico sobre as propriedades do titânio e como esse metal se comporta quando soldado. Será também necessária uma revisão bibliográfica sobre a execução da soldagem por fricção e como as soldas serão classificadas quanto a sua qualidade (WAINER, Emílio, 1992).

Em um segundo momento, o trabalho também tem como enfoque agregar conhecimentos diversos da área da mecânica estrutural e fabricação, necessárias para o amadurecimento da tese e para uma formação mais robusta dos autores como engenheiros. A vivência e a interação com laboratórios, metalografia, ensaios de tração, usinagem, soldagem, consulta a *handbooks* e artigos será descrita ao longo do documento.

1.4 Justificativa

O estudo, de como o titânio se comporta em um processo de soldagem por fricção, utilizando torno convencional, pode ser útil para inúmeras aplicações. Nesse trabalho, tal estudo poderá resultar na redução de custo em um produto. Além disso, poderá facilitar a aplicação dessa técnica tanto em empresas quanto em universidades que não possuem uma máquina específica para realização de solda por fricção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica cita condições para realização do escopo desse trabalho, limitando-se a análise técnica da soldagem por fricção, análises metalográficas e resistência mecânica. Pinos de titânio, com formato cilíndrico, são frequentemente soldados para uso odontológico. O estudo de Atoui (2008), referente a junções para fins odontológicos, aponta como possíveis opções de junção, a soldagem TIG e a laser.

O titânio é um metal com boa usinabilidade e pode ser unido de diversas formas, como por exemplo, usando processo de roscagem ou parafusagem (LEYENS e PETERS, 2003). Entretanto, rosquear ou parafusar dois componentes, desde o começo do projeto, foi apontado como uma alternativa indesejada já que existe uma grande possibilidade de microrganismos se instalarem nas folgas existentes entre as roscas e os seus respectivos filetes. Logo, como o componente é implantado completamente no interior de um ser humano, não seria interessante um ponto acumulador de organismos potencialmente nocivos.

2.1 Titânio e suas ligas

O titânio, utilizado comercialmente, só passou a ser produzido em grande escala depois que o Dr. Wilhelm J. Kroll descobriu uma maneira de reduzir o tetracloreto de titânio ($TiCl_4$), por volta dos anos quarenta. Inicialmente foi muito utilizado em projetos aeronáuticos devido a sua ótima relação peso/resistência mecânica e alta resistência a fadiga (LEYENS e PETERS, 2003). Seu uso em próteses médicas se deu a partir da descoberta de uma outra propriedade, o titânio não se oxida em contato com os fluídos do corpo humano. Isso acontece devido à alta reatividade com o oxigênio, que forma uma camada passiva, oxidada de forma estável em sua superfície (PINTO, G., 2005).

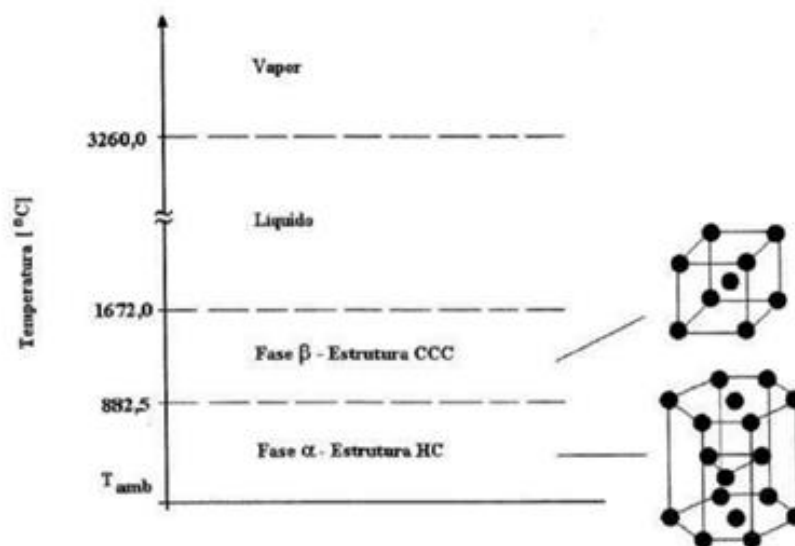
Essa não oxidação o transforma em um biomaterial, ou seja, inerte e incapaz de gerar respostas adversas do corpo como uma degradação tóxica ao organismo (MAIA et al, 2010). A definição de biomaterial segundo Park e Lakes (2007) é: *“qualquer material usado para fabricar dispositivos para substituir uma parte ou uma função do corpo de uma maneira segura, confiável, econômica e fisiologicamente aceitável”*. Se comparado a outros biomateriais, o Ti cp (comercialmente puro) e suas ligas ($E = 100 - 120$ Gpa), são os que mais se aproximam do osso humano ($E = 10 - 30$ Gpa) apesar

de ser de 3 a 12 vezes maior. Essa característica, aliada a ótima resistência a fadiga gera, segundo Leyens e Peters (2003), uma superioridade quando o mesmo é utilizado em implantes ósseos.

Outra vantagem do titânio é sua superfície dura e lisa, que limita a adesão de partículas estranhas. Essa qualidade atende perfeitamente aos requisitos de aparatos médicos, que, além de ser biocompatível, devem possuir um baixo coeficiente de atrito em suas paredes internas para dificultar a adesão de microrganismos indesejados (ASM INTERNATIONAL, 1990).

O Ti grau 2 possui uma estrutura cristalina alpha hexagonal compacta (HC). Entretanto, ao passar dos 885 °C, se transforma numa fase beta cúbica de corpo centrado(CCC), conforme a Figura 1.

Figura 1 – Tipos de estrutura cristalina do titânio.



Fonte: Macedo (2012)

Quando são adicionados elementos como alumínio e vanádio, são formadas as ligas de titânio, como a mais difundida Ti-Al-4V (titânio grau 5). Essas adições geram, dependendo dos elementos que são incluídos, ligas alpha com predomínio da microestrutura alpha, ligas alpha+beta com uma microestrutura composta e ligas beta, com predominância desta fase (ASM INTERNATIONAL, 1990). Os elementos adicionados, chamados de intersticiais, impactam positivamente na resistência mecânica do material e são escolhidos dependendo das aplicações desejadas (PINTO G., 2005).

Mesmo o titânio dito comercialmente puro (cp), como o grau 2, possui certa porcentagem de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio, conforme tabela 1. Mas apenas o oxigênio é adicionado de forma intencional nessas ligas (LEYENS e PETERS, 2003). Analisando a Tabela 1 é possível perceber que o aumento do oxigênio gera aumento da resistência mecânica. Assim como o carbono, os outros elementos estão presentes devido aos processos de fabricação.

Tabela 1 – Tipos de titânio e suas composições.

Elementos	Grau 1	Grau 2	Grau 3	Grau 4
Nitrogênio	0,03	0,03	0,05	0,05
Carbono	0,10	0,10	0,10	0,10
Oxigênio	0,18	0,25	0,35	0,40
Hidrogênio	0,13	0,13	0,13	0,13
Limite de resistência [Mpa]	350	500	650	800
Limite de escoamento [Mpa]	250	400	550	700
Alongamento %	24	20	18	15

Fonte: Adaptada de Pinto G. (2005).

A liga de titânio Ti-6Al-4V apesar de apresentar menos oxigênio que os titânios comercialmente puros apresentados na tabela 1, a inclusão do vanádio e alumínio, melhora ainda mais seu limite de resistência variando entre 900-1100 Mpa (Wojtaszek et al, 2013). Na Tabela 2 é apresentada a composição mássica do Ti-6Al-4V.

Tabela 2: Composição Ti-6Al-4V.

Elemento	Al	C	Fe	H	N	O	V	Ti
Composição (%massa)	6	0,1	0,4	0,015	0,05	0,2	3,5-4,5	Balanço

Fonte: Adaptada de Boivineau et al (2005).

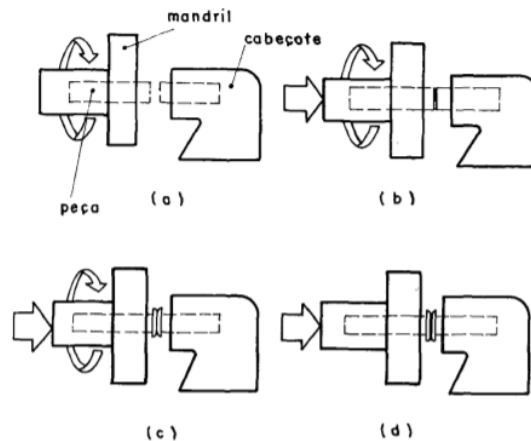
Segundo Callister (2013), a desvantagem do titânio e suas ligas é a alta reatividade em altas temperaturas, implicando na necessidade de técnicas especiais de fusão e fundição. Isso encarece o titânio, tornando-o uma liga de alto valor onde deve-se minimizar desperdícios. Além disso, essa reatividade acarreta em uma condição de contorno para esse trabalho, que consiste em evitar altas temperaturas.

2.2 Soldagem por fricção

2.2.1 Características Gerais da Soldagem por Fricção

A soldagem por fricção rotativa (RFW, do inglês, Rotary Friction Welding), apesar de gerar uma pequena região onde existe a fusão dos materiais, é considerada soldagem de estado sólido, pois não atinge temperaturas elevadas, como ocorre na soldagem a arco (O'BRIEN e GUZMAN, 2007). Existem duas variações desse processo, a RFW convencional, apresentada pela União Soviética em 1939, e a RFW por inércia, patenteada pelos EUA em 1966 (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992). O processo convencional está ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Funcionamento da RFW convencional.



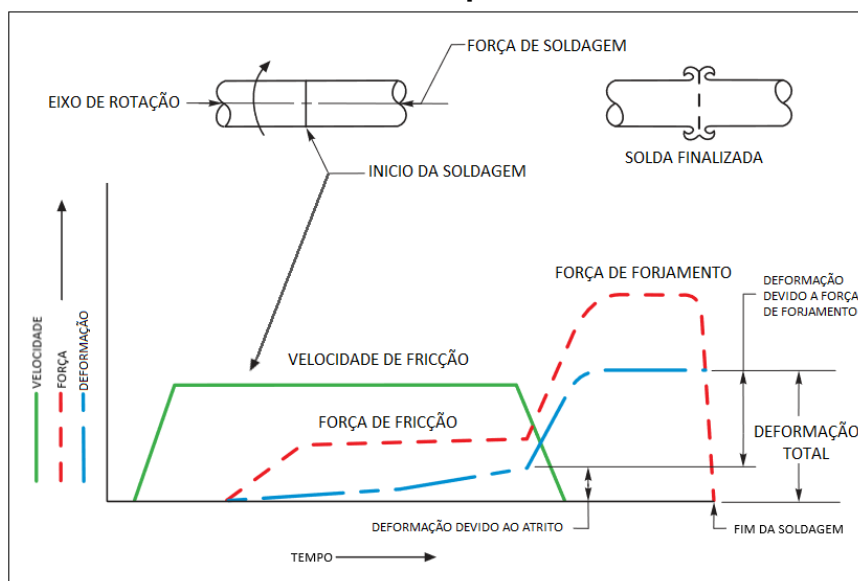
Fonte: Adaptada de Wainer, Brandi e Mello (1992).

A soldagem inicia com uma rotação relativa entre as peças (a), para então aproximá-las até que, devido ao atrito, o sistema comece a gerar calor (b). Após isso, é aplicada uma pressão durante um intervalo de tempo (c) e então é cessada a rotação por meio de um sistema de freios, aumentando a pressão aplicada anteriormente durante um segundo intervalo de tempo até que o forjamento ocorra (d) Fig. 2. Já a RFW por inércia, que foi patenteada pelos EUA (1966), se difere da convencional por transferir a energia de soldagem por um volante inercial, conectado a uma das peças, que é rotacionado até uma velocidade pré-definida para então ser pressionado contra a segunda peça (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992).

2.2.2 Parâmetros de Soldagem Por Fricção

Assim como na soldagem por arco elétrico, onde devem ser definidos o tipo de eletrodo, corrente, tensão e velocidade de avanço, o processo de soldagem por fricção convencional também necessita da definição de parâmetros. Para esse processo os parâmetros de soldagem, ilustrados na Figura 3, são: velocidade de rotação, força axial de fricção, tempo que essa força é aplicada, tempo de frenagem, força axial de forjamento e tempo de aplicação dessa segunda carga (O'BRIEN e GUZMAN, 2007).

Figura 3 - Variação dos parâmetros da soldagem RFW convencional em função do tempo.



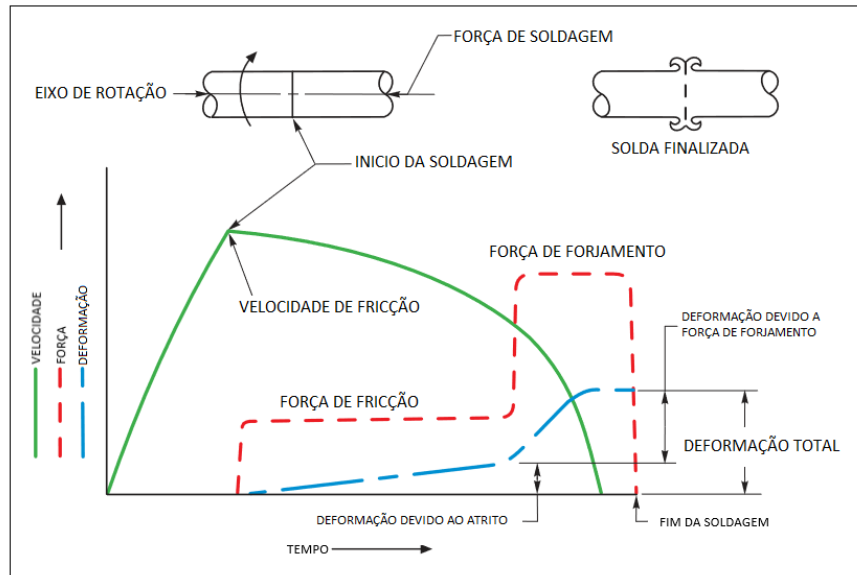
Fonte: Imagem adaptada de O'brien e Guzman (2007).

Como pode ser observado, os parâmetros de soldagem variam ao longo do tempo. No primeiro estágio, quando há aumento da velocidade angular, como as peças ainda não entraram em contato, não existe força nem deformação. No segundo estágio, ou aquecimento, as peças são aproximadas até que a força de fricção comece a agir e gerar calor, quando então, ocorre o início da deformação. No terceiro estágio a força de fricção atinge seu ápice por um tempo determinado. No quarto estágio é realizada a frenagem do equipamento para então ser aplicada a força de forjamento. Isto gera mais deformação devido a pressão ser maior e o calor ser mais intenso (UDAY et al, 2010).

Já para a soldagem por fricção inercial, os parâmetros são a velocidade de rotação inicial, massa inercial do sistema, força de aplicação da força de fricção e de

forjamento. A Figura 4 apresenta os estágios do processo com as variações dos parâmetros, nos respectivos tempos de aplicação.

Figura 4 - Variação dos parâmetros da soldagem RFW inercial em função do tempo.



Fonte: figura adaptada de O'brien e Guzman (2007).

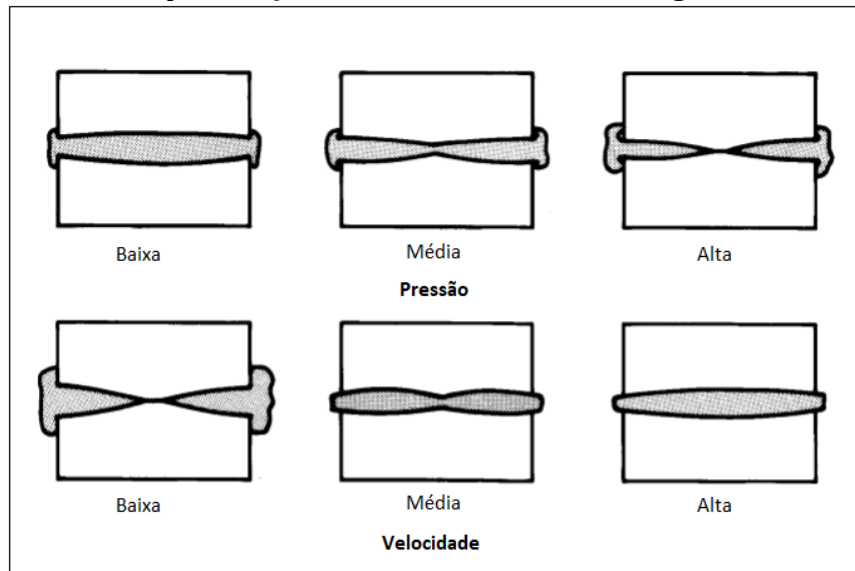
Como o princípio de funcionamento do RFW inercial é baseado na inércia de rotação do volante, o estágio 1 é muito importante. Nele a máquina deve ser rotacionada a uma velocidade angular bem maior que o método convencional, para então iniciar o contato. A partir do segundo estágio não se tem grandes diferenças quanto ao funcionamento em relação ao processo convencional. Apenas a força de fricção que é aplicada integralmente até o sistema entrar em repouso. A frenagem não é mais necessária, pois as peças são frenadas devido ao atrito (UDAY et al, 2010).

Apesar de muito parecidos, os processos possuem diferenças; a energia de soldagem, resistência da solda e o torque necessário para aplicação do método são maiores no caso da solda RFW inercial, já o tempo de soldagem e tamanho da zona termicamente afetada (ZTA) tem seu valor maior na RFW convencional. Importante apontar também, que a RFW inercial gera a necessidade de um equipamento mais robusto, com garras do mandril mais resistentes para serem capazes de suportar o torque mais elevado (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992).

Quando se varia um parâmetro e os outros tem valores fixados, é comum ocorrer diferentes tipos de juntas soldadas. Isso ocorre, por exemplo, em casos que o aumento das velocidades implicam em um menor coeficiente de atrito e maior tempo

de condutividade térmica, produzindo mais calor e conseqüentemente aumentando a deformação da peça (NU et al, 2019). Entretanto, outros fatores também podem ser variados. A Figura 5 mostra como a junta de solda se comporta ao variar-se a energia de soldagem, pressão e a velocidade angular.

Figura 5 - Variação de parâmetros em uma soldagem RFW inercial.



Fonte: adaptada de O'brien e Guzman (2007).

Como já mencionado, a velocidade é diretamente proporcional ao calor gerado, enquanto a pressão de fricção (primeira pressão aplicada), é inversamente proporcional. Quando pressões muito altas são aplicadas elas inibem a fricção entre os metais, impedindo a geração de calor necessário, conforme a figura 5. Ou seja, altas pressões e velocidades baixas tendem a estabelecer juntas de soldas indesejadas (O'BRIEN e GUZMAN, 2007). Sendo assim, deve-se definir uma velocidade e uma pressão de fricção que possam gerar calor suficiente para produzir uma solda de qualidade com resistência mecânica suficiente e desejável.

A solda por fricção possui algumas peculiaridades: metais com baixo atrito, algumas vezes devido a presença de elementos lubrificantes em sua composição, não são soldáveis (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992). Ao se soldar metais diferentes, existe uma menor previsibilidade quanto a qualidade da junta soldada, pois apesar do processo de RFW normalmente não atingir o ponto de fusão dos materiais na região de contato, ocorre difusão e mistura dos materiais (O'BRIEN e GUZMAN, 2007). Como um dos objetivos deste projeto é unir dois cilindros de titânio, algumas informações sobre a soldabilidade deste material foram averiguadas na literatura. Tanto Wainer,

Brandi e Mello (1992) quanto O'brien e Guzman (2007), apresentam tabelas de soldabilidade dos materiais mostrando como cada material se comporta quando soldado por RFW com uma grande variedade de materiais. Ambas as literaturas indicam que o titânio produz uma boa junta de solda quando duas peças desse mesmo material são soldadas, validando a ideia proposta.

Para auxiliar a definição dos parâmetros que serão executados neste estudo buscou-se encontrar na literatura casos de RFW utilizando titânio como matéria prima. Avinash et al (2007), com o intuito de analisar a RFW convencional de barras cilíndricas de Ti 6Al 4V, fixou os parâmetros de soldagem, alterando apenas a velocidade de rotação. Os parâmetros fixados foram força de fricção (1,5 kN); força de forjamento (3kN); fricção até deformação de 4 mm (equivalente ao tempo de fricção) e tempo de forja de 2 segundos. Foram utilizadas três rotações diferentes, 1000 rpm, 1500 rpm e 2000 rpm. Analisando as amostras soldadas quanto a microestrutura, percebeu-se que, quanto maior a velocidade de rotação, maiores os grãos formados na zona de transição (ZT). A variação da dureza das amostras também teve diferença; para as duas menores velocidades a maior dureza foi encontrada próximo ao centro, já para 2000 rpm houve uma variação desprezível entre a dureza no centro e nas regiões mais afastadas. O teste de tração se mostrou favorável a este tipo de soldagem uma vez que as soldas se mantiveram intactas e as falhas ocorreram na base das amostras. O melhor resultado do teste de tração ocorreu para a amostra de 1500 rpm, seguido por 2000 rpm e 1000 rpm respectivamente. Segundo Avinash et al (2007), os testes foram conclusivos para apontar a soldagem por fricção, como uma boa opção para unir esta liga de titânio.

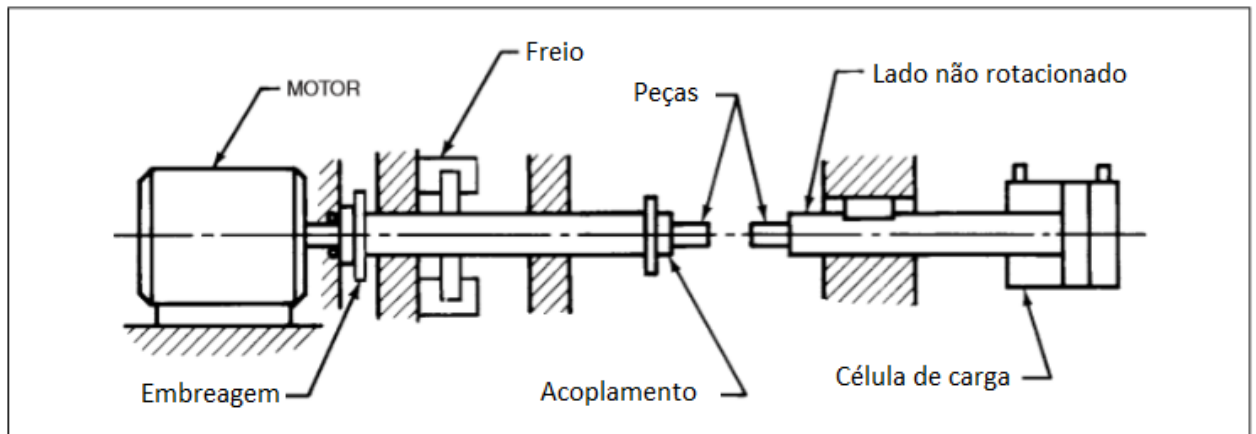
Outro estudo recente envolvendo soldagem por fricção foi realizado por Palanivel et al (2017). Neste caso, foram soldados cilindros não maciços de titânio grau 2, que foram limpos com acetona e foi utilizado gás argônio, para que a região de solda não entrasse em contato com o ar. Todas as amostras tiveram a mesma dimensão de 60 mm de diâmetro externo com 3,9 mm de espessura de parede. Foram testadas as velocidades de 1600, 1900, 2200, 2500 e 2800 rpm. Os parâmetros que não sofreram alteração de um experimento para o outro foram: força de fricção (20kN), tempo de soldagem (22s), força de forjamento axial (30kN) e frenagem após encurtamento de 0,6 mm. Dessa forma, foi possível comparar como as velocidades maiores de soldagem afetam o processo. Na micrografia observou-se que quanto

maior a rotação, menores são os grãos formados. Esse refino de grão afetou diretamente a microdureza encontrada, com valores maiores para as maiores rotações. O teste de resistência à tração apontou melhores resultados para maiores velocidades, até 2200 rpm. A partir dessa velocidade a resistência passou a cair. O autor ainda aponta que a geração de rebarba aumentou linearmente em comparação com a rotação.

2.2.3 Exemplo de adaptação de torno

A Figura 6 mostra um exemplo de *set up* possível para realização da RFW convencional. Necessita-se de um motor para gerar a velocidade angular, embreagem para transferir a rotação, freio para realizar a frenagem da peça, acoplamentos especiais para fixação dos cilindros e uma célula de carga, por onde são medidas as pressões de fricção e forjamento.

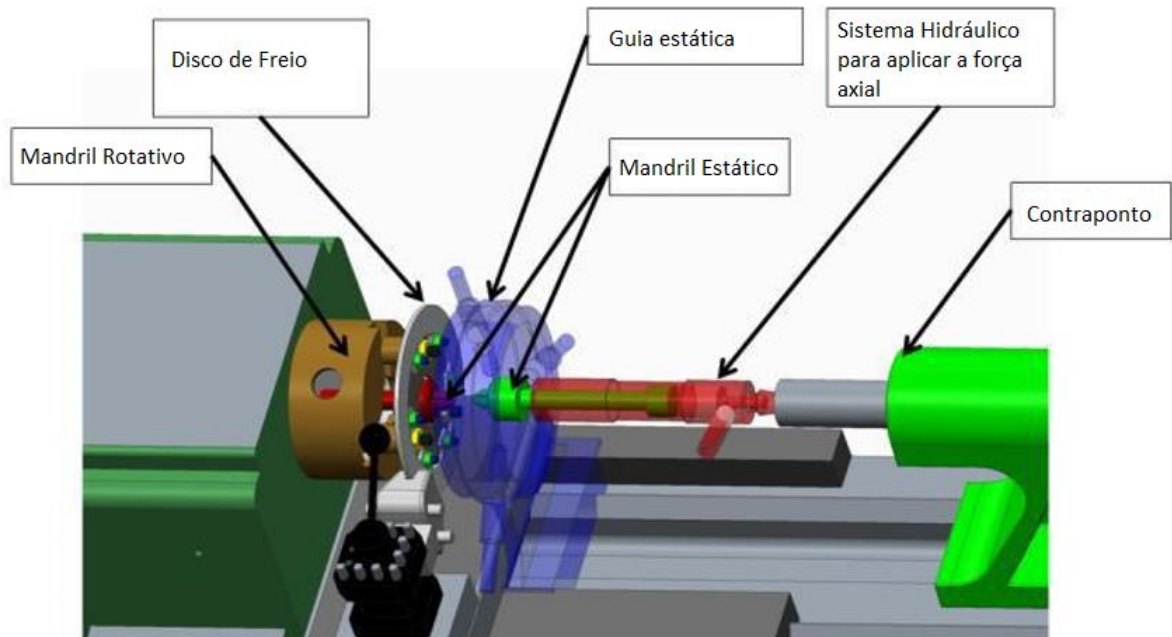
Figura 6 - Exemplo de *set up* de Soldagem de fricção convencional.



Fonte: Adaptado de O'brien e Guzman (2007).

A execução, porém, pode ser realizada em um torno convencional adaptado, como o que foi realizado por Patel, A e Patel, I (2017). A Figura 7 mostra o *set up* utilizado.

Figura 7 - Exemplo de set up de soldagem de fricção convencional.



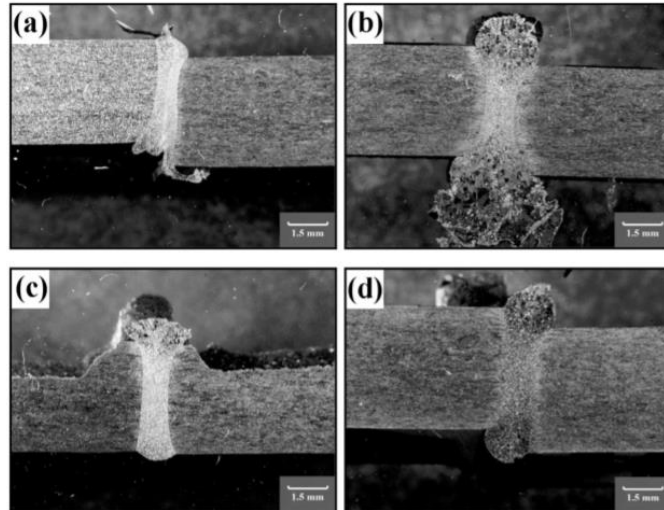
Fonte: Traduzido de Patel,A e Patel,I (2017).

A rotação foi gerada utilizando o motor do torno. A peça rotativa foi então presa no mandril rotativo do torno. Um sistema de freio a disco foi adicionado ao sistema para aumentar a velocidade de frenagem. A peça estática foi presa em um mandril em um sistema hidráulico que por sua vez foi preso ao contraponto. Para evitar vibrações e para fins de alinhamento e centralização foi adicionada uma guia no mandril da peça estática. Esse set up, segundo o autor, obteve êxito em sua aplicação e objetivo final.

2.2.4 Qualidade da solda

Após realização da solda, testes de resistência mecânica, microdureza e micrografia foram efetuados. Primeiramente, podem ser realizados testes de inspeção visual, pois é possível perceber a *falha* na soldagem antes de realizar testes mais complexos. Na Figura 8 são mostrados os defeitos típicos na região de solda. As amostras (a), (c) e (d) não geraram calor ou pressão suficientes para formar uma solda adequada. Por outro lado, ocorreu o inverso na amostra (b), onde foi gerada uma deformação excessiva com grande formação de rebarba.

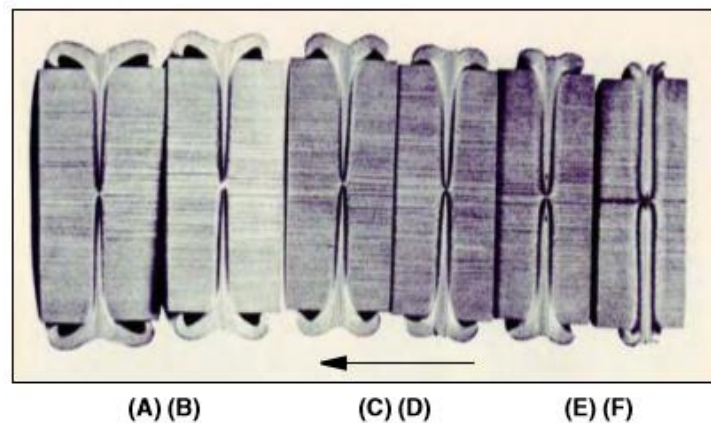
Figura 8 - Tipos de falha na soldagem por fricção de tubos - (a) Temperatura não suficiente, (b) Excessiva, (c) Forjamento incompleto e (d) Plastificação insuficiente.



Fonte: Adaptado de Palanivel et al (2017).

A Figura 9 mostra descontinuidades no centro da solda, que mesmo com o aumento da deformação axial, como nas amostras (a) e (b), não deixam de existir.

Figura 9 - Descontinuidades no centro de solda, seta em direção a maior deformação axial.

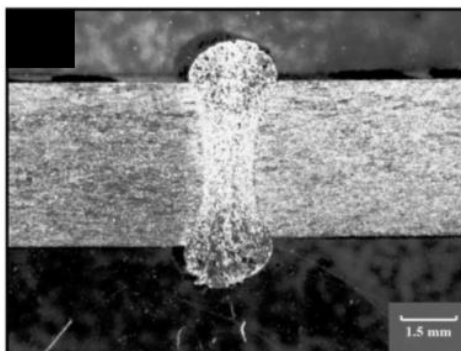


Fonte: O'brien e Guzman (2007).

Essas descontinuidades podem ser relacionadas com impurezas, erros da escolha dos parâmetros e peças mal preparadas (O'BRIEN e GUZMAN, 2007).

O mesmo artigo de Palanivel et al (2017) cita que a formação de rebarba em pequena quantidade pode ter um efeito saudável a peça, pois pode retirar contaminantes e óxidos indesejados. A Figura 10 mostra uma solda considerada de boa qualidade, que poderá ser utilizada para comparação com nossos corpos de prova.

Figura 10 - Junta soldada por RFW convencional.



Fonte: Palanivel et al (2017).

2.2.5 Metalografia das juntas soldadas da literatura

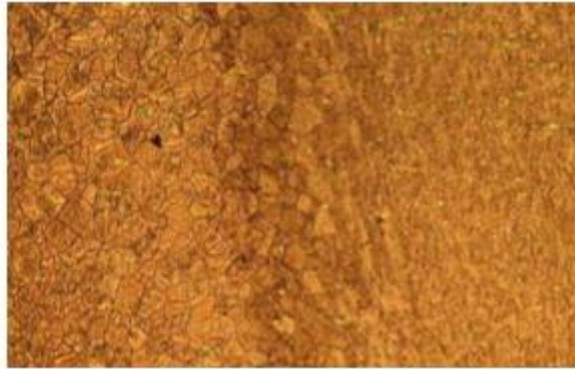
O calor gerado entre as peças altera as propriedades metalúrgicas, mas não só das faces em contato (zona fundida). Devido a condução térmica, um certo volume de material adjacente também é afetado (ROCHA, 2018). É então delimitada uma zona de material termicamente afetada (ZTA) que será o objeto de estudo quanto a metalografia. A ZTA apresenta diferenças em suas propriedades em função da distância da ZF, pois quanto mais afastado, menor a transferência de calor no material. O ponto de transição entre a zona termicamente afetada e o metal de base é chamada por Avinash et al (2007) de zona de transição (ZT).

Para efeito de comparação da metalografia encontrada nas juntas soldadas, iremos utilizar os já citados trabalhos de Avinash et al (2007) e Palanivel et al (2017). Segundo Avinash, a melhor junta soldada, quanto a resistência a tração, foi a solda utilizando a rotação de 1500 rpm.

Como é possível observar na figura 11, houve aumento de grão na zona de transição, porém na ZTA, houve diminuição do tamanho de grão possivelmente aumentando sua dureza. A junta soldada tem a característica de continuidade quanto a microestrutura. Na Figura 12 é mostrada a mesma amostra, porém com aumento

maior (valor de aumento não especificado pelo autor). O crescimento de grão fica mais evidente (AVINASH et al, 2007).

Figura 11 - Junta soldada por RFW convencional 1500 rpm (200x de aumento).



Fonte: Avinash et al (2007).

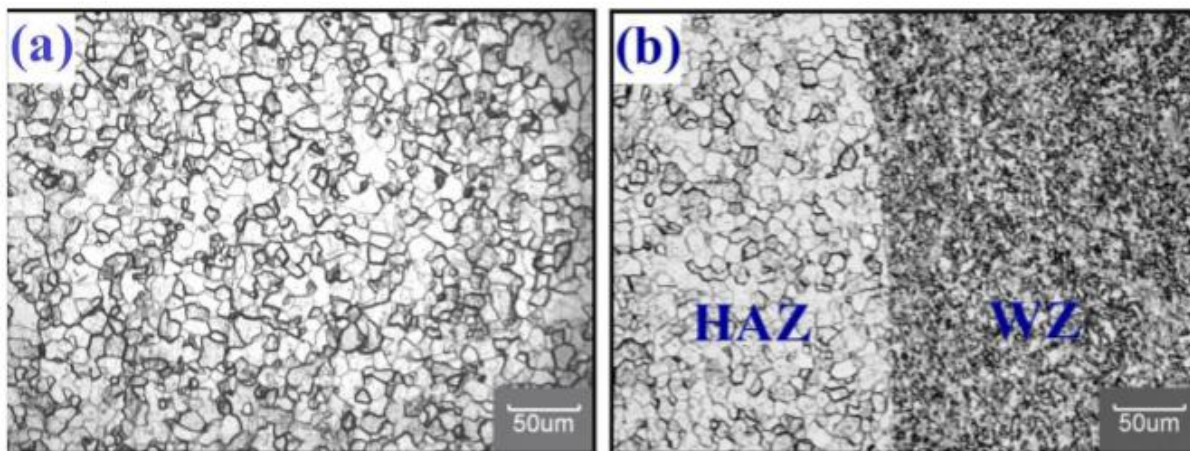
Figura 12 - Junta soldada por RFW convencional 1500 rpm (aumento maior que 200x).



Fonte: Avinash et al (2007).

A melhor junta soldada encontrada, quanto a resistência a tração, no trabalho de Palanivel et al (2017), foi utilizando a rotação de 2200 rpm. Na Figura 13 é mostrada a região de transição entre a ZTA (*heat affected zone* – HAZ) e o metal de base. A maior dureza encontrada, em todos os casos, foi na zona com maior refino de grão, ou seja, na zona soldada (*welding zone* – WZ)

Figura 13 - Junta soldada por RFW convencional 1500 rpm.



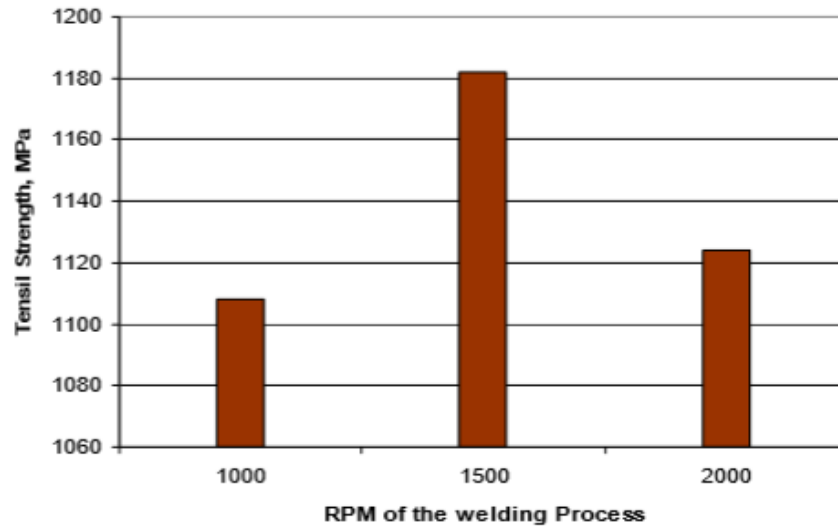
Fonte: Palanivel et al (2017).

Fica claro que houve uma redução do tamanho de grão na zona soldada, porém a solda apresentou uma grande descontinuidade na zona de transição entre a zona soldada e a zona termicamente afetada. Claramente houve diferença entre a metalografia encontrada por Avinash et al (2007) e aquela encontrada por Palanivel et al (2017). No primeiro caso houve aumento de grão na zona de transição o que não ocorreu com Palanivel. Essa diferença foi citada pelo próprio Palanivel em seu artigo uma vez que o mesmo se fundamentou também em Avinash. Isso pode ter ocorrido devido as diferenças nos parâmetros, por se tratarem de diferentes tipos de titânio.

2.2.6 Ensaio de tração das juntas soldadas da literatura

Ensaio de tração realizados por Avinash et al (2007), foram feitos utilizando a máquina servo hidráulica (Instron – Modelo 8032) com taxa de deformação de 0,5 mm/minuto. Na Figura 14 são mostrados seus resultados.

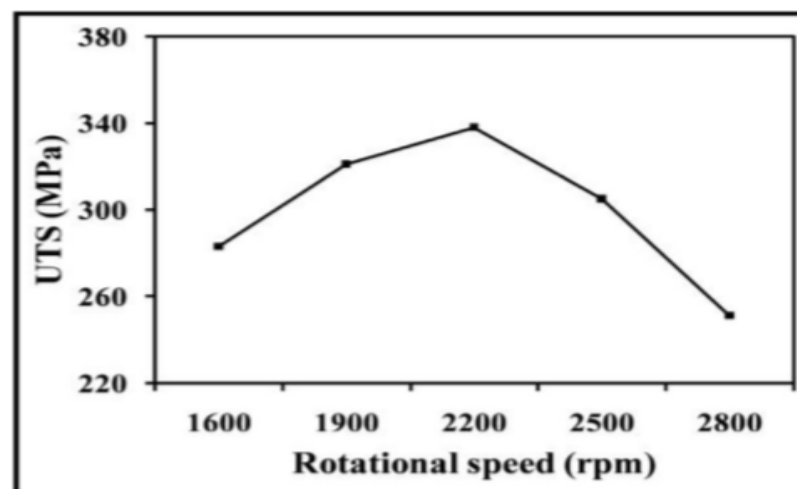
Figura 14 – Ensaio de tração realizado por Avinash et al (2007).



Fonte: Avinash et al (2007).

Como é possível observar os melhores resultados foram encontrados para 1500 rpm, com uma resistência a tração superior a 1180 Mpa. É importante salientar que todas as fraturas formaram um perfil característico de fratura dúctil, “taça cone”, e aconteceram no metal de base e não na solda. O mesmo ocorreu para o caso de melhor resistência a tração de Palanivel (2200 rpm). Na Figura 15 é mostrado os resultados dos ensaios de tração realizados em uma máquina Instron 1195 por Palanivel.

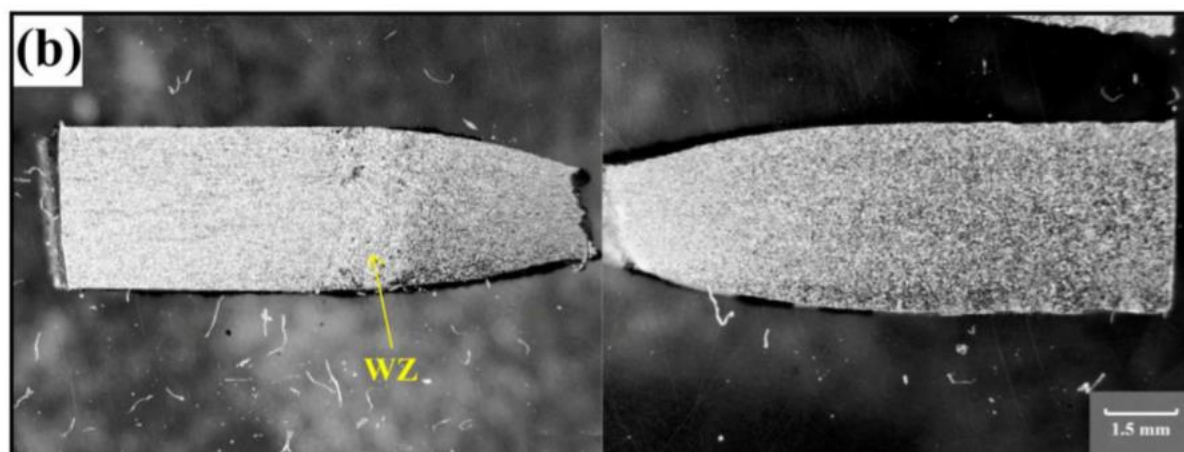
Figura 15 Resultado dos ensaios de tração realizados por Palanivel et al (2017).



Fonte: Palanivel et al (2017).

O maior resultado para as amostras de titânio grau 2 soldadas, aproximou-se dos 240 Mpa. Para esse caso, foi tirada fotografia da área fraturada utilizando o aparelho SEM (TESCAN VEGA 3). A Figura 16 ilustra o caso mencionado.

Figura 16 – Resultado do ensaio de tração de 2200 rpm realizado por Palanivel et al (2017).



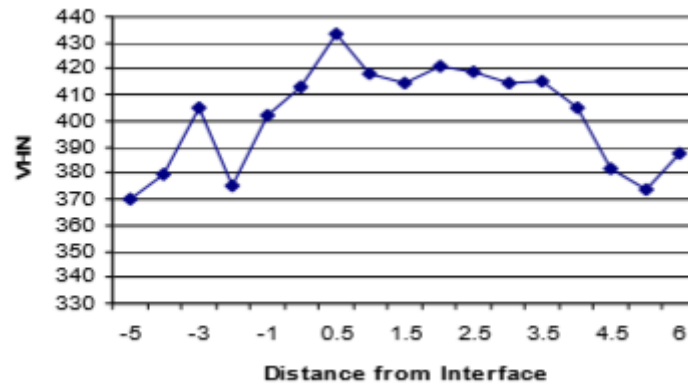
Fonte: Palanivel et al (2017).

O ponto identificado como WZ (*Welding zone*) indica onde a peça foi soldada, portanto a fratura ocorreu no metal de base e não diretamente na solda. A fratura é considerada dúctil pelo formato característico,

2.2.7 Ensaio de dureza das juntas soldadas da literatura

Quanto a dureza encontrada na região da solda, Avinash realizou ensaio de dureza Vickers variando a distância em relação ao centro da solda. Na Figura 17 são mostrados os resultados para a amostra com parâmetro de 1500 rpm.

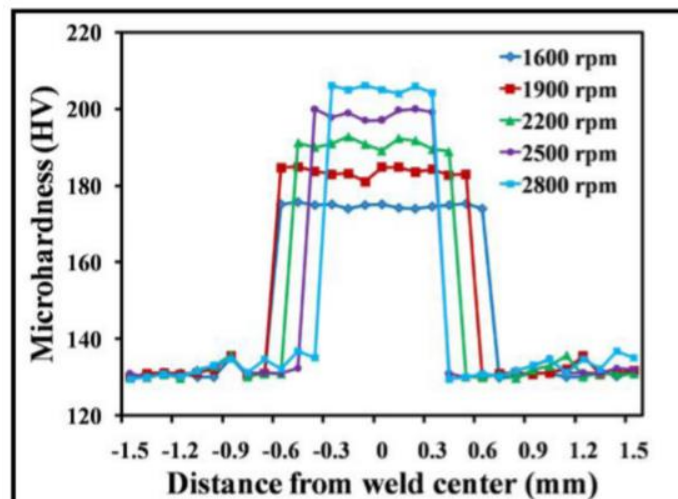
Figura17 – Ensaio de tração realizado por Avinash et al (2007).



Fonte: Avinash et al (2007).

A dureza aumentou conforme a proximidade ao centro da solda, o que de fato era esperado devido a redução do tamanho de grão nessa mesma área. Os resultados encontrados por Palanivel et al (2017), seguiram a mesma lógica, com as maiores durezas encontradas no centro da solda, conforme Figura 18.

Figura 18 – Resultado do ensaio de tração de 2200 rpm realizado por Palanivel et al (2017).



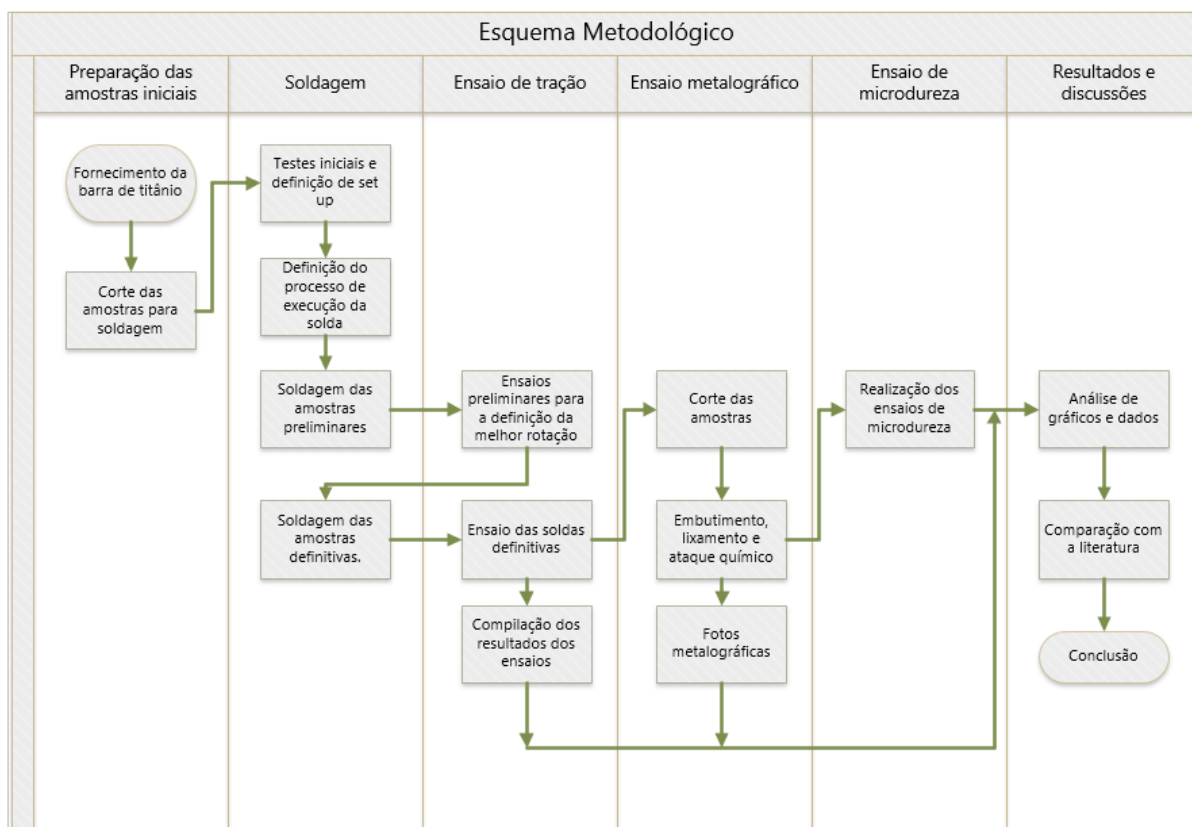
Fonte: Palanivel et al (2017).

Segundo a figura 18, as durezas aumentaram linearmente em relação ao aumento da rotação, com as maiores durezas para os espécimes soldados a 2800 rpm. Isso se deve a redução do tamanho de grão o que gera também uma fragilização do material.

3 METODOLOGIA

Um resumo das metodologias empregadas nesse trabalho foi resumida e está apresentada no fluxograma mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Esquema metodológico dos procedimentos usados nesta pesquisa.



Fonte: autoria própria

As barras cilíndricas de titânio grau 5 foram fornecidas pela empresa parceira com 6,5 mm de diâmetro e com um comprimento total de 1300 milímetros. Para a obtenção das amostras para soldagem as barras foram cortadas, em uma serra do tipo fita, em tarugos com 25 mm de comprimento, para se ter o maior número de amostrar possíveis, com o menor comprimento suficiente para a realização dos ensaios de tração. Além disso, as amostras foram faceadas para que a região de contato apresentasse o maior nível de planicidade possível. Cada amostra foi medida 3 vezes com paquímetro, para maior acuracidade do comprimento.

O maquinário adequado para executar uma solda por fricção, como descrito na revisão bibliográfica, tem um funcionamento muito parecido com a de um torno

mecânico. Levando em consideração essa semelhança, a maneira mais plausível de executar a solda, com a infraestrutura disponível na UTFPR (Campus Curitiba, Sede Ecoville), foi através do uso de um torno convencional ROMI ID-20, apresenta na Figura 20.

Figura 20 - Torno ROMI ID-20.



Fonte: autoria própria

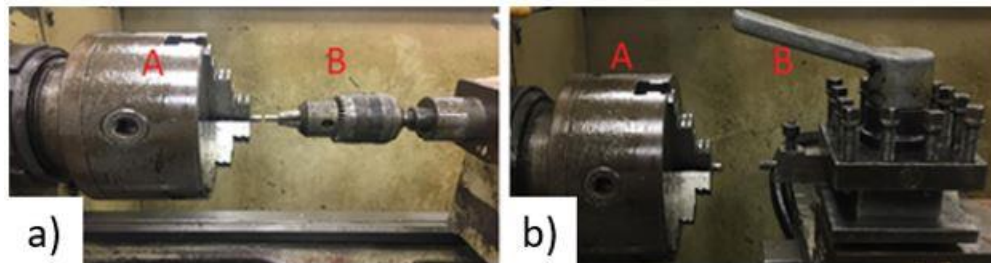
Inicialmente alguns experimentos, envolvendo amostras preparadas de aço baixa liga, foram efetuados com o objetivo de se obter uma noção inicial sobre a execução do processo e funcionamento do maquinário. Como o torno foi definido como o equipamento onde serão realizadas as soldas por fricção, algumas adaptações tornaram-se necessárias e serão descritas a seguir.

3.1 Set ups testados para a realização dos testes

O controle da força axial, idealmente, deveria ser controlado por uma célula de carga ou um pistão pneumático ou hidráulico, porém como não foi possível ter acesso a estes componentes, outros meios de se quantificar a força axial foram propostos.

Durantes os ensaios preliminares, uma das peças foi presa na castanha do torno, intitulada de peça “A”, e rotacionada até os valores pré-estipulados. Esse ponto foi comum a todos *set ups* estudados. O que diferiu entre as configurações testadas foi a maneira com que a segunda peça, também chamada de peça “B”, foi fixada, ou a forma com a qual ela foi guiada em relação a peça em rotação. Atribui-se à peça “B”, a aplicação da chamada força de forja. A Figura 21 ilustra os possíveis pontos de fixação das peças “A” e “B”. Na Figura 21.a, com mandril e na Figura 21.b, na própria torre porta ferramenta.

Figura 21 - Demonstração das possíveis opções de fixação das peças “A” e “B”.



Fonte: autoria própria

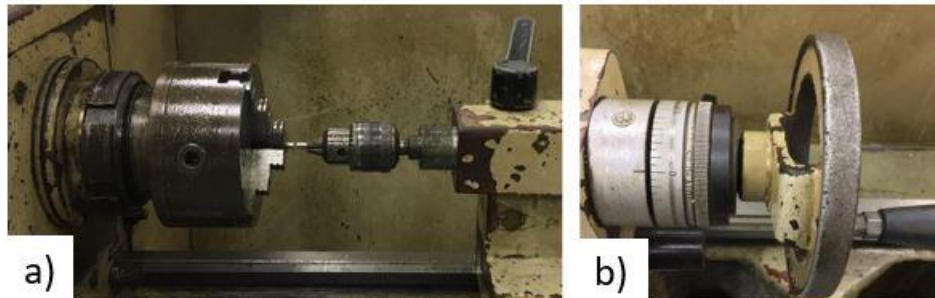
A opção demonstrada na Figura 21.a apresentou maior intensidade de vibração e menores possibilidades de ajustes. Já a figura 21.b da direita ilustra a fixação no porta ferramentas que possibilita ajustes quanto a posição geométrica da peça “B” facilitando a centralização e, por ser um sistema mais robusto, diminui a vibração.

3.1.1 Primeiro *Set up*

Na configuração inicial, optou-se por fixar a peça “B” em um mandril preso ao contraponto do torno (Figura 22.a) calcular a força de fricção nesses testes. O arco de volta do volante do contraponto (Figura 22.b), era medido com intenção de encontrar alguma correlação entre essas unidades, ou seja, arco de volta versus força de fricção. Ainda durante os testes preliminares de soldagem por fricção, realizados com aço baixa liga, o sistema demonstrou ter baixa rigidez resultando em uma vibração excessiva, a qual prejudicava a solda conduzindo a desalinhamentos e geração de forças não axiais. A principal fonte dessa vibração excessiva, após análise visual, foi a distância estabelecida entre o contraponto e a castanha, o que gera um alto

momento fletor. A Figura 22 ilustra o *set up* e a maneira de aplicação da força de fricção.

Figura 22: Demonstração dos possíveis locais de fixação.

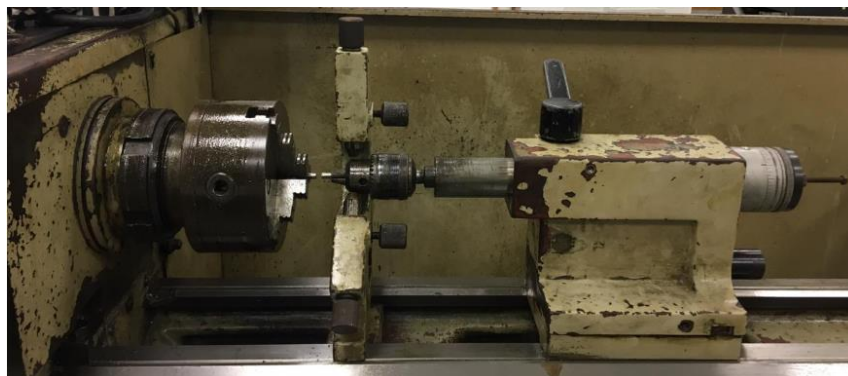


Fonte: autoria própria

3.1.2 Segundo set up

Para contornar o problema vibracional, foi acoplada, através do barramento do torno, uma luneta de três apoios no mandril, conforme mostra a Figura 23, o que viabiliza a aproximação entre as peças a serem soldadas e aliviando a vibração durante o processo.

Figura 23 - Segundo *set up* com a inclusão da luneta e a aproximação do contraponto junto a castanha.

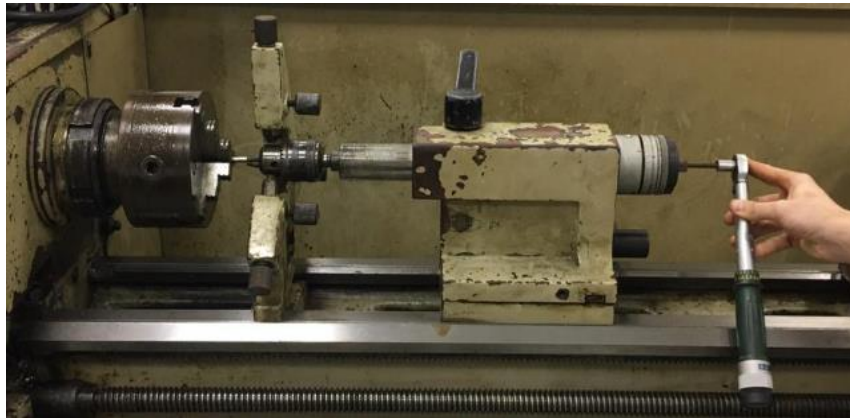


Fonte: autoria própria

Embora o problema vibracional não tenha sido completamente solucionado, a luneta foi capaz de reduzir o nível de vibração, possibilitando a execução de melhores soldas. Entretanto, como o contraponto não possui um ajuste fino, a ponto de manter as peças concêntricas, os problemas de alinhamento ainda foram recorrentes. Após os ensaios com o primeiro *set up*, chegou-se à conclusão, de que a maneira de

mensurar a força de forja deveria ser alterada. Afinal, por mais que o arco de volta aplicado no volante fosse constante, pelo simples fato de ser uma operação manual, as diferentes velocidades de aplicação desse avanço, poderiam implicar em forças de forja diferentes. Logo, no segundo *set up*, para estimar a força de fricção foi empregado um torquímetro. A Figura 24 mostra o segundo *set up* com a inclusão do torquímetro no eixo onde antes estava fixado o volante de avanço do contraponto.

Figura 24 - Segundo *set up*.



Fonte: autoria própria.

Foi utilizado o torquímetro de estalo (SATA 96101), com capacidade de medição 6 Nm e 25 Nm de torque, acoplado a um parafuso, substituindo o volante de avanço do contraponto.

3.1.3 Terceiro set up

Com o objetivo de solucionar o problema de alinhamento, foi proposto um terceiro *set up*. Neste, o contraponto foi retirado do barramento do torno e a peça “B”, inicialmente presa ao contraponto, foi fixada na torre porta ferramentas. Isto porque, é um conjunto mais robusto, com um melhor ajuste fino e mobilidade nos três eixos, como apresenta a Figura 25.

Figura 25 - Terceiro set up.

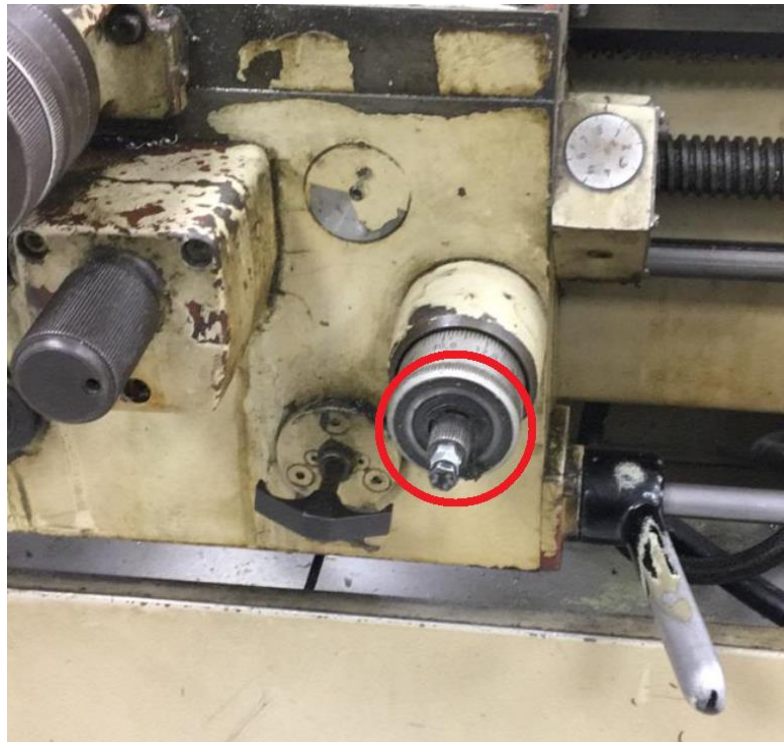


Fonte: autoria própria

Embora este *set up* tenha demonstrado ser o melhor quanto a vibração e posicionamento, a impossibilidade de medir a força axial na solda e, conseqüentemente, de se obter a replicabilidade dos testes, implicou no descarte dessa configuração.

Houve uma tentativa em aplicar o torque na porca que fixa o volante do carro, porém, o movimento de avanço do carro afrouxava o parafuso e impedia o avanço. É importante frisar que existe uma possibilidade de adaptação de um torquímetro no avanço da porta ferramenta. Para essa adaptação, seria necessária a confecção de uma ferramenta com um perfil especial que se comporte como uma “fêmea” do eixo estriado do avanço do carro. Figura 26 ilustra o eixo do volante do avanço do carro.

Figura 26: Eixo estriado que controla o avanço do carro (circulado em vermelho).



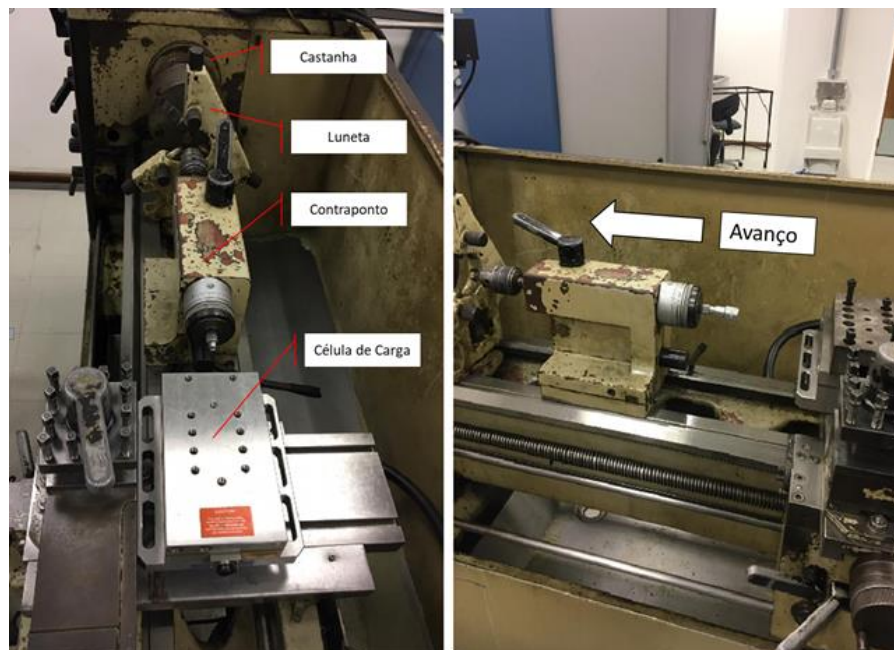
Fonte: autoria própria

O eixo estriado é conectado ao fuso do avanço do carro. Dessa forma, possibilitaria um avanço preciso.

3.1.4 Quarto *set up*

Um quarto *set up* foi testado procurando estabelecer uma forma de medição mais precisa das forças envolvidas no processo, através do emprego de uma célula de carga. Conforme ilustrado na Figura 27, nessa configuração, a peça “B” voltou a ser fixada ao mandril do contraponto e a célula de carga, da marca Kistler, foi fixada no carro. Então, o carro foi pressionado contra o contraponto, agora sem trava, avançando o conjunto com o mandril no sentido da peça “A”, fixada na castanha.

Figura 27 - set up número quatro.



Fonte: autoria própria.

Dessa forma, as forças de fricção e forja poderiam ser mensuradas em tempo real através do display da célula de carga. Porém, pelo fato do contraponto se encontrar sem trava, mantendo-se “solto”, a vibração no contato das peças foi, mais uma vez, excessiva.

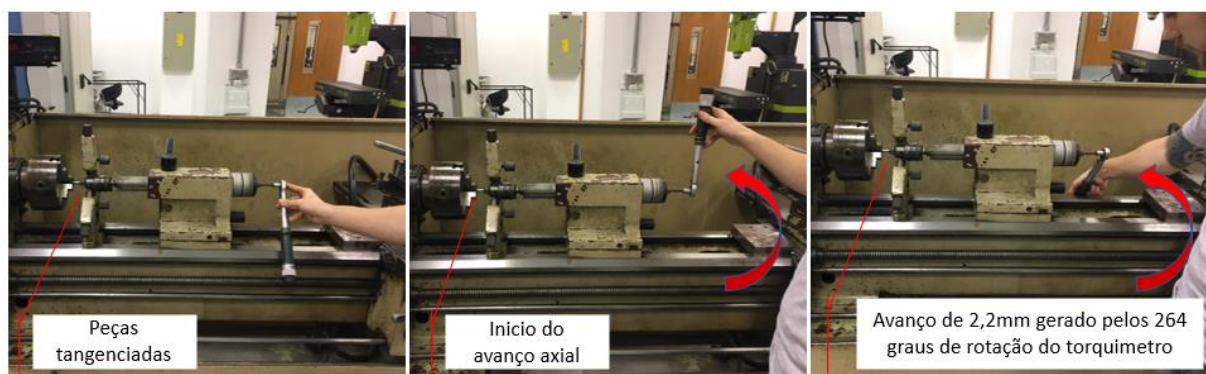
Optou-se por retornar ao segundo *set up*, que embora não garanta uma centralidade perfeita entre as peças, implicando em ajustes mais grosseiros na preparação dos testes, propiciando o controle da força axial e permitindo a replicabilidade dos parâmetros.

3.2 Metodologia desenvolvida

Para dar início a soldagem por fricção, mediu-se com um paquímetro os comprimentos iniciais de cada amostra 3 vezes. Então, as peças “A” e “B” foram fixadas na castanha e no mandril do contraponto, para em seguida ser iniciada a rotação da peça “A”. O parâmetro selecionado para variação foi a velocidade de rotação aplicada alternando entre 1000, 1600 e 2500 rpm. Foram escolhidas essas velocidades, pois eram as disponíveis no equipamento e as que mais se aproximavam

dos valores utilizados nos estudos da literatura. Além disso, foi considerado os resultados obtidos nos ensaios preliminares de soldagem, com aço baixo carbono. Ficou definido que a parada de máquina, ocorreria após aplicação do maior arco de volta possível com o torquímetro acoplado ao eixo de avanço do contraponto, resultando na força de fricção. Procedimento de aplicação da força de fricção está exemplificado na Figura 28. O valor do arco, de 264 graus, foi medido utilizando o transferidor digital DWM 40L da Bosch.

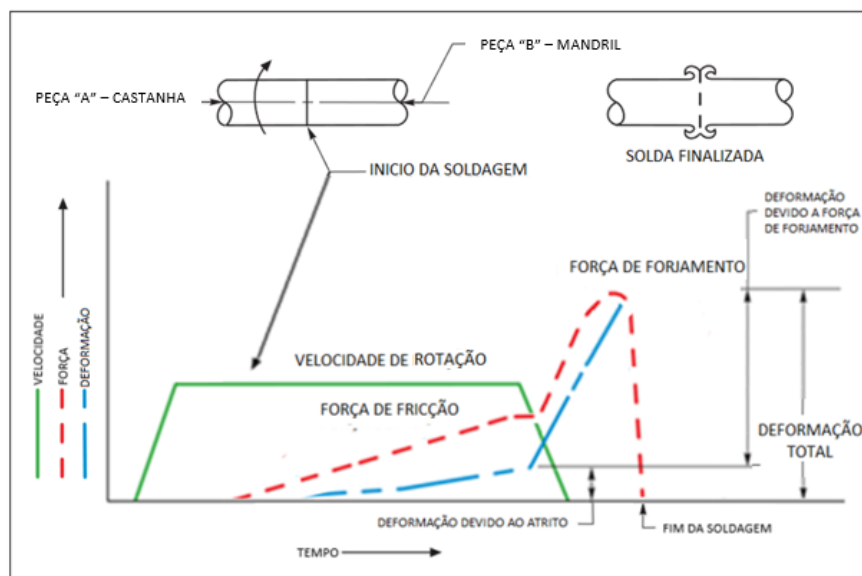
Figura 28 – Imagens fotográficas da sequencia de aplicação da força fricção.



Fonte: Autoria própria.

Na sequência, logo após o desligamento da máquina, é iniciado o processo de aplicação da força de forja até que o torquímetro estale. A amostra soldada foi retirada e seu comprimento final foi medido com um paquímetro. Dessa forma, o encurtamento total pôde ser avaliado. A Figura 29 ilustra a evolução dos parâmetros de soldagem em função do tempo, assim como nas figuras 3 e 4 adaptadas de O'brien e Guzman (2007).

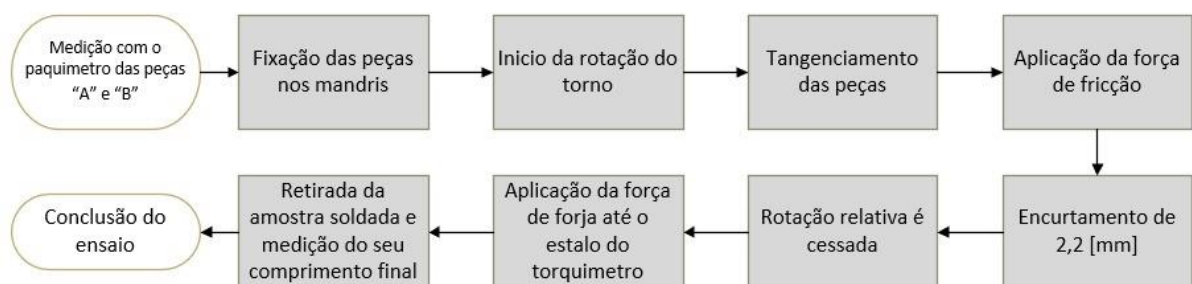
Figura 29 – Variação dos parâmetros em função do tempo.



Fonte: Adaptada de O'brien e Guzman (2007).

Diferentemente do que acontece na figura 3, onde a força de fricção é mantida por um certo período de tempo. No processo proposto, assim que a força de fricção é aplicada a rotação é cessada e, somente então, aplica-se a força de forja até o estalo em 6 Nm sem que as forças fossem mantidas por um período de tempo específico. A Figura 30 ilustra o passo a passo do processo proposto através de um fluxograma.

Figura 30 – Fluxograma dos processos de realização da soldagem por fricção.



Fonte: Autoria própria.

Esse procedimento foi aplicado, utilizando o segundo *set up*, tanto nos testes preliminares para definição da melhor rotação, quanto nas soldagens definitivas. O próximo passo foi dar início às soldagens preliminares.

3.3 Ensaio de soldagem preliminares

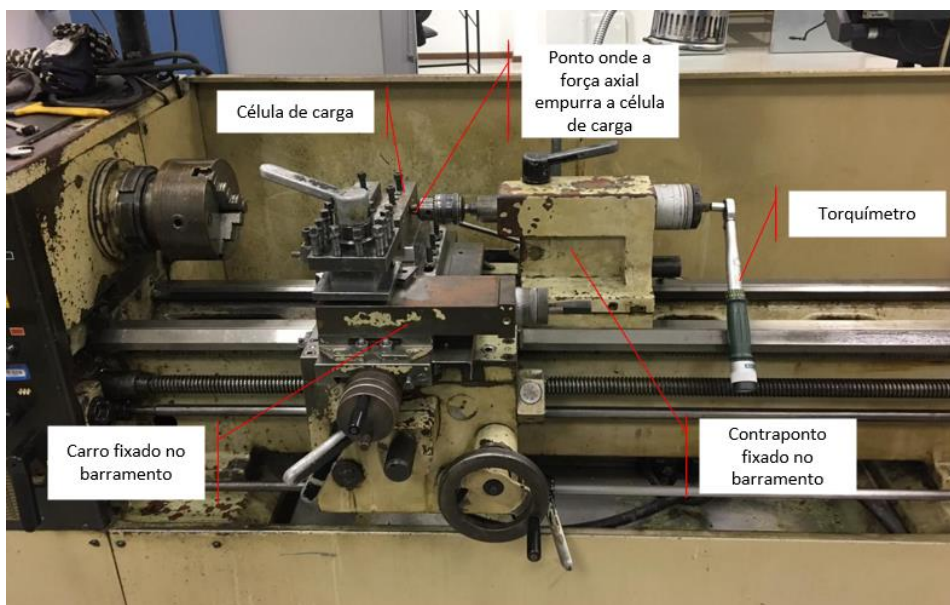
Com as amostras cortadas de diâmetro 6,5mm por 25mm de comprimento, realizou-se nove soldas, utilizando ao total, dezoito amostras. Executou-se as soldas utilizando todos os parâmetros já definidos, porém, variando-se a rotação. Foram realizadas três soldas para um conjunto de três velocidades, 1000 rpm, 1600rpm e 2500 rpm.

Em seguida, a qualidade superficial das soldas, foram analisadas, através de inspeções visuais. Além disso, as amostras preliminares passaram por ensaios de tração com a finalidade de selecionar o melhor parâmetro de rotação.

3.4 Estimativa das forças axiais

Para a determinação da força axial de forja, foi utilizada uma célula de carga parafusada no carro do torno, que permaneceu estática no barramento. O contraponto também foi travado no barramento do torno. Dessa maneira, o mandril era avançado até um ponto, em que entrava em contato com a célula de carga. Somente então, era aplicado o torque até que o torquímetro estalasse na configuração de 6 Nm, resultando em uma certa força axial. As Figuras 31 e 32 mostram a configuração montada.

Figura 31 – Vista lateral do ensaio para medição da força axial.



Fonte: Autoria própria.

Figura 32 – Vista superior do ensaio para medição da força axial.



Fonte: Autoria própria.

O processo representado nas figuras 31 e 32 foi repetido dezoito vezes, gerando dezoito forças axiais máximas. O cálculo da força de fricção não pode ser efetuado, pois nas frações de tempo iniciais, quando a peça no contraponto, pressionava a peça em rotação, o calor é gerado rapidamente, elevando a temperatura da peça e diminuindo localmente o módulo de elasticidade. Dessa maneira, o estalo do torquimetro não ocorre indicando apenas que a força de fricção é inferior à de forja. A partir dos resultados foi realizada uma análise estatística para um valor médio da força axial aplicada.

3.5 Ensaio de tração

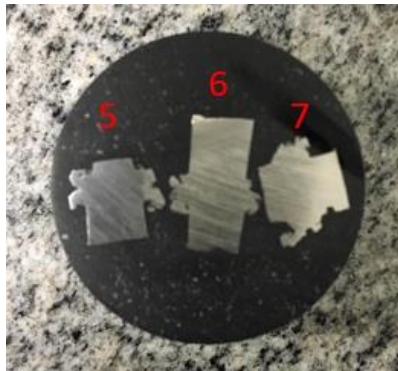
Os ensaios de tração, realizados no laboratório de comportamento mecânico do DAMEC/a UTFPR, foram feitos na máquina de tração EMIC 2300 Series com capacidade máxima de aplicação de força igual a 100 kN. A velocidade de deformação

utilizada em todos os testes foi de 0,5 mm/min de forma idêntica à literatura de Avinash et al (2007).

Importante esclarecer que os ensaios desenvolvidos não ocorreram de acordo com a norma. Os corpos de prova não tiveram a região da solda usinados para diminuir o diâmetro local da peça, formando um “pescoço”. A norma justifica a necessidade da confecção do “pescoço”, devido ao concentrador de tensão gerado pelas pinças, deixando essa região mais propícia ao rompimento. Porém, o motivo da não confecção do pescoço foi a falta de alinhamento entre as peças soldadas que, ainda que pouco, poderia ser prejudicial no momento de uma possível usinagem. Soma-se a isto, o desconhecimento das forças envolvidas durante a usinagem, implicando numa possível fragilização da solda.

Outras informações que serão comparadas com aquelas encontradas na revisão bibliográfica são as imagens metalográficas obtidas no laboratório de metalografia da UTFPR. Três peças, que passaram pelo ensaio de tração, foram cortadas na serra fita e embutidas juntas com baquelite, como exemplificado na Figura 33.

Figura 33: Peças embutidas.



Fonte: Autoria própria.

Assim, as amostras embutidas passaram pelo processo de lixamento com cinco lixas de Carbureto de Silício e de granulometrias diferentes 80, 160, 320, 400 e 600, com o objetivo de obter-se uma superfície com menor rugosidade. O processo de lixamento foi aplicado até que a espessura das peças atingisse 6,5 mm, coincidindo com o diâmetro inicial das amostras e possibilitando as análises de metalografia e dureza. Após o lixamento, a peça foi polida em uma politriz com solução de Alumina. Posteriormente, para possibilitar a visualização da superfície no microscópio, as amostras foram submetidas a um ataque químico através da aplicação do reagente

85% água destilada, 5% ácido nítrico e 10% ácido fluorídrico, durante 20 segundos e lavado com álcool etílico comum.

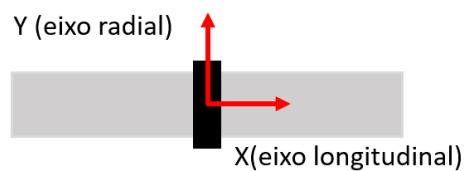
Por fim, utilizando o equipamento CoolSnap-Pro, acoplado ao microscópio Olympus BX5, algumas fotos foram obtidas com aumento de 200 e 500 vezes. Foram fotografados o metal de base, região de transição e a própria solda.

3.6 Medição de dureza

Para melhor comparação dos resultados obtidos com a revisão bibliográfica, um ensaio de microdureza, também realizado no laboratório de metalografia da UTFPR, foi feito na peça.

Uma medição foi realizada bem no centro da solda da amostra 7, distância medida com o paquímetro. Foram realizadas 9 medições de dureza, a partir do centro da solda, tanto para o lado esquerdo quanto para o lado direito (eixo x), conforme Figura 34.

Figura 34: Esquema explicativo para o entendimento das direções de medição de dureza.



Fonte: Autoria própria.

O espaçamento entre cada medição foi de 0,300 mm, distância medida com o micrômetro da máquina. A dureza também foi medida ao longo do cordão de solda (radialmente, sentido y), respeitando a mesma medida de 0,300 mm entre cada medição. Para realizar a medição pontual da microdureza, a máquina Japonesa HMV-2 da Shimadzu utilizada para o ensaio, possui um cone de perfil piramidal de base quadrada. A máquina, então, aplica uma carga pré-estipulada para as medições de 0,3 kgf, ou 2,9419N durante 15 s. Usando a lente do microscópio da máquina, com aumento de 400 vezes, as duas diagonais do losango impresso são medidas e a máquina calcula a dureza local. As peças 5 e 6 não tiveram sua dureza calculada radialmente. A dureza, nessas duas peças, foi calculada apenas no eixo x e seguiu o

mesmo procedimento da peça 7, embora as medições tenham acontecido em apenas um sentido do eixo x.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaio de tração das amostras preliminares

Os testes preliminares de soldagem, realizados com rotação de 1000 rpm não resultaram em soldas. Devido à baixa rotação, pouco calor foi gerado na região de contato das faces, impossibilitando que as mesmas se unissem. Os ensaios de tração não foram realizados pois os corpos se separavam, assim que eram retirados dos mandris. Para a rotação de 1600 rpm o primeiro teste de soldagem, assim como nos testes anteriores, não formou junção entre os corpos. O segundo teste aparentemente teria resultado em uma boa solda, porém a peça rompeu na interface da solda com pouca força aplicada durante o ensaio de tração. O terceiro teste com a velocidade de 1600 rpm originou uma boa solda, confirmado pelo ensaio de tração em que o corpo de prova rompeu em seu metal de base. O mesmo ocorreu com os três testes finais, referentes a rotação de 2500 rpm, que durante o ensaio de tração romperam, também, em sua base e não na solda, resultado semelhante ao obtido por Palanivel et al (2017). Na Tabela 3 são compilados os resultados encontrados.

Tabela 3 – Resultados preliminares ensaio de tração.

	Rotação [rpm]	Força (N)	Tensão [Mpa]
teste 1	1000		Não soldou
teste 2	1000		Não soldou
teste 3	1000		Não soldou
teste 4	1600		Não soldou
teste 5	1600	99,04	2,98
teste 6	1600	29051,00	875,48
teste 7	2500	30562,00	921,01
teste 8	2500	31306,00	943,43
teste 9	2500	31469,00	948,34

Fonte: Autoria própria.

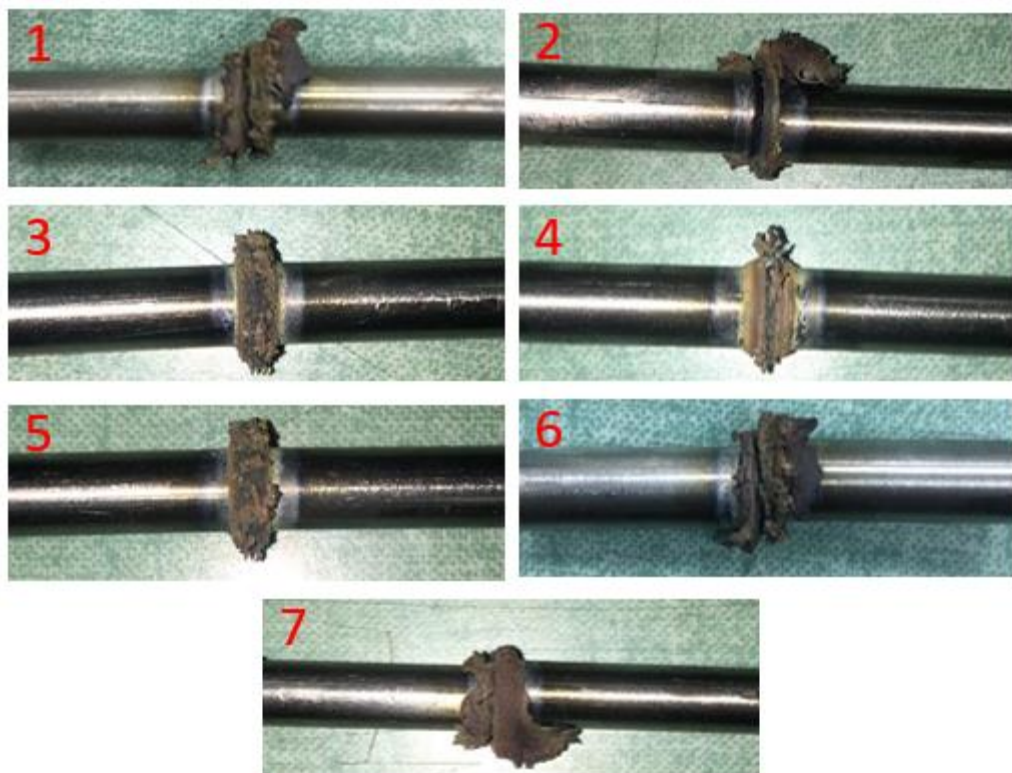
Como a área transversal da região de solda é ligeiramente maior que a área onde as pinças prendem o material para realização do ensaio e existem concentradores de tensão devido aos sucros nas pinças de fixação, não é possível

afirmar qual a resistência exata das soldas realizadas. É razoável concluir que, como na rotação de 2500 rpm, os corpos de prova suportaram entre 30 e 31 kN de força axial, este resultado atende aos objetivos deste trabalho. Nessa etapa então, definiu-se a rotação de 2500 rpm a ser utilizada como um dos parâmetros nas amostras definitivas.

4.2 Amostras definitivas

As soldas das amostras definitivas, em sua maioria, apresentaram um ótimo aspecto, com aparente coesão entre as peças. O maior problema encontrado foi a falta de alinhamento coaxial entre os cilindros, sendo que algumas amostras ficaram bem centralizadas e outras nem tanto. A Figura 35, mostra a região de solda das sete amostras definitivas.

Figura 35 – Região da solda amostras definitivas.



Fonte: Autoria própria.

É possível notar a olho nu, maior desalinhamento nas peças 1, 2, 6 e 7 em detrimento das peças 3, 4 e 5, o que de certa forma mostra a falta de replicabilidade no processo. Essa heterogeneidade de resultados também ocorreu quanto ao

encurtamento final. A Tabela 4 mostra o comprimento inicial de cada peça, a soma desses dois valores, o comprimento final pós solda e o valor calculado de cada encurtamento.

Tabela 4 – Comprimentos iniciais e finais em mm

Amostras	Peça "A"	Peça "B"	"A" +"B"	Comprimento soldado	Encurtamento
1	25,28	24,24	49,52	45,84	3,68
2	25,10	24,92	50,02	45,62	4,40
3	25,12	25,34	50,46	44,84	5,62
4	24,92	24,70	49,62	44,60	5,02
5	25,30	25,30	50,60	44,56	6,04
6	25,10	25,06	50,16	44,44	5,72
7	25,16	25,20	50,36	44,90	5,46

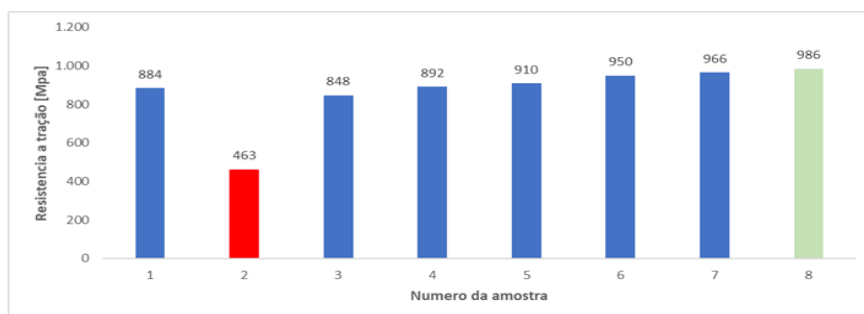
Fonte: Autoria própria.

A força de forja foi aplicada até que ocorresse o estalo, ou seja até que atingisse 6 Nm ou, conforme calculado com a célula de carga, 2058 ± 213 N. Embora o valor final da carga aplicada fosse conhecido, já era esperado que não houvesse um padrão de encurtamento, pois nem sempre o torquímetro estalava com o mesmo arco de volta.

4.3 Ensaios de tração amostras definitivas

Ao fim dos ensaios de tração com os corpos de prova soldados a 2500 rpm, os resultados foram compilados, e mostrados na Figura 36.

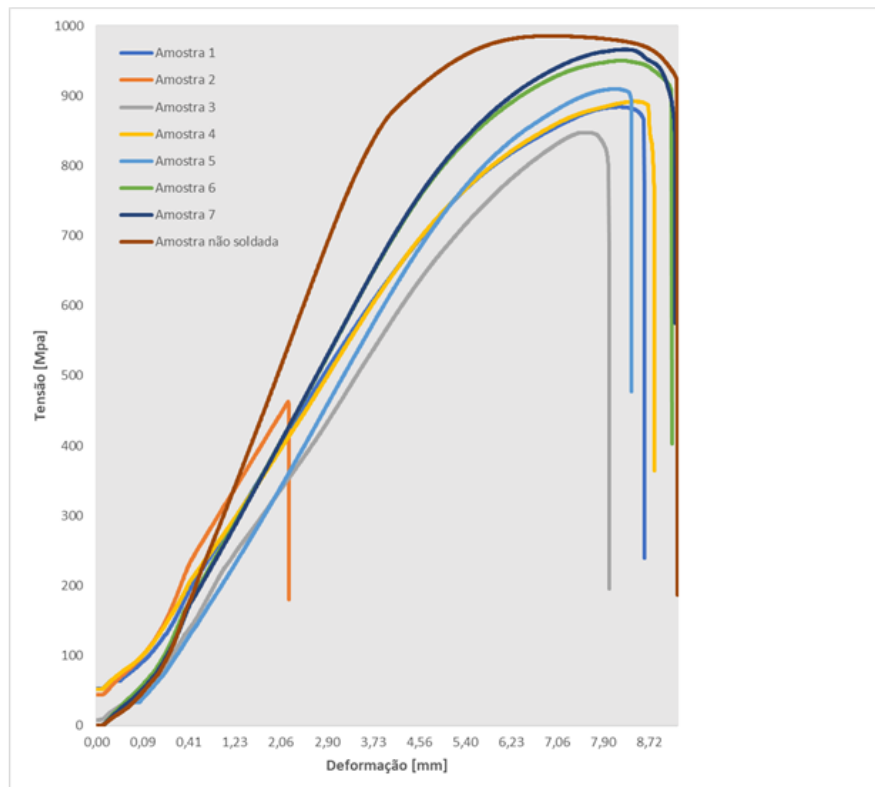
Figura 36 – Limite de resistência a tração (ou tensão última) calculada das amostras 1 a 8.



Fonte: Autoria própria.

Houve certa variação em relação a cada amostra. Isso pode ser efeito de como o concentrador de tensão, gerado pela pinça que fixa a peça a ser tensionada, agiu diferentemente em cada uma das amostras. Em vermelho está a peça dois, única a não romper na base do material, rompendo na solda com uma tensão abaixo do esperado. Essa amostra foi considerada ponto fora da curva e não será contabilizada na média da resistência mecânica. A amostra 8 foi tracionada sem ser soldada, ou seja, na forma como foi fornecida. Esta também rompeu na base, resultado semelhante as demais amostras. A Figura 37 mostra a deformação dos corpos em função da tensão aplicada.

Figura 37 – Curva Tensão x Deformação De todas as amostras.



Fonte: Autoria própria.

As amostras se comportaram com certa heterogeneidade, com a amostra não soldada apresentando maior módulo de elasticidade, porém rompendo em tensão e deformação próxima as demais. Desta forma, pode-se dizer que o processo de soldagem provoca uma redução na ductilidade do titânio estudado. Apesar disso, os resultados encontrados demonstraram que a solda por fricção proposta resultou em uma resistência mecânica aceitável, uma vez que, assim como no estudo de Avinash

et al (2017), todas as peças (menos a amostra 2) romperam na base do material, suportando em média 908 Mpa. Na Figura 38, são mostradas algumas das fraturas resultantes do ensaio de tração.

Figura 38 – Fratura das amostras 1, 2 e 8 (não soldada).



Fonte: Autoria própria.

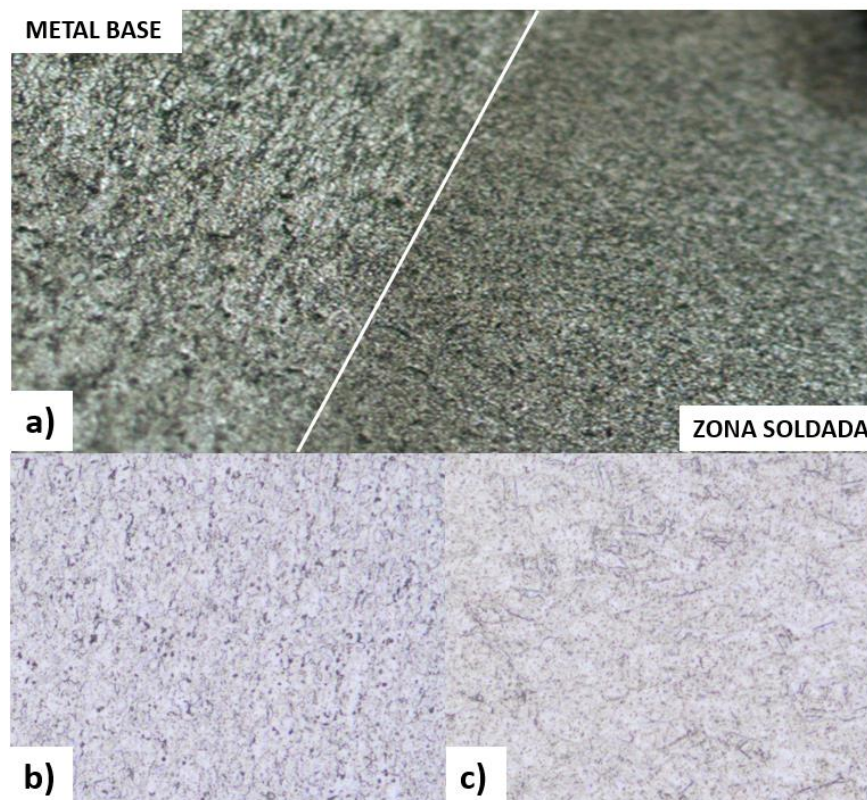
A fratura dúctil, segundo Callister (2013), pode ser caracterizada pelo contorno da área fraturada, quando o mesmo tem o formato *taça e cone*, ou seja, quando a área transversal da região fraturada tende a diminuir formando um pescoço. Esse perfil de fratura foi encontrado nas amostras 1 e 8, assim como em todas as outras amostras com exceção da amostra 2 que rompeu como um material frágil. Pode-se perceber que para essa amostra não houve formação de pescoço e como mostrado na figura 37, houve um rompimento repentino, sem que ocorresse transição da região elástica para a plástica. Isso pode ter ocorrido por defeito interno da região da solda ou pela falta de centralização das peças que quando tracionadas geraram uma tensão de cisalhamento entre os corpos.

4.3.1 Imagens metalográficas

Embora o ácido usado como reagente contasse com os mesmos elementos químicos, as concentrações foram diferentes. Ou seja, o ácido usado para os ataques tinha a composição de 85% água destilada, 10% ácido fluorídrico e 5% ácido nítrico. Enquanto o ácido utilizado por Avinash et al (2007), foi de 91% água destilada, 6% ácido fluorídrico e 3% ácido nítrico. Mesmo após 20 segundos de ataque com a

solução, as fotografias ficaram de média qualidade, impossibilitando comparação minuciosa com as imagens tiradas pelo autor (Avinash). Porém, mesmo sem a qualidade adequada, algumas semelhanças puderam ser identificadas conforme Figura 39.

Figura 39: a) Região da interface solda - metal base 200X. b) Região do centro de solda 500X. c) Região do metal base afastada da solda 500X.



Fonte: Autoria própria.

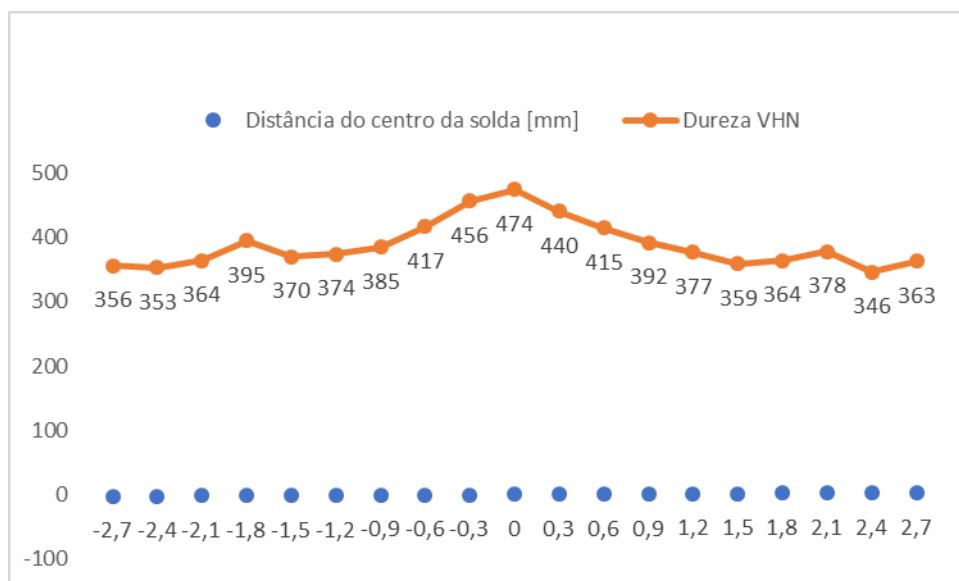
Uma semelhança muito evidente com o ocorrido na bibliografia foi o refinamento de grão da região de solda, devido a um tratamento térmico induzido pelo processo, como exibido na imagem 38.a, onde a região de solda passou por uma variação abrupta de temperatura, ocasionando no aumento da dureza. Outro fato que também foi contemplado, através da mesma imagem, foi a solda contínua ao longo da interface, uma das vantagens desse processo. A imagem 39.b mostra a região do centro de solda isolada, para confirmar, como na literatura, o refino de grão da região. Já a imagem 39.c ilustra grãos mais grosseiros do metal de base que não sofreram influência da ZTA (Zona termicamente afetada).

Segundo Avinash et al (2007), quando maior a velocidade, menor a ZTA. Como a velocidade usada nesse trabalho foi 2500 rpm (superior a maior velocidade utilizada pelo autor da bibliografia), a ZTA ficou quase imperceptível nas imagens. Outro fator que pode contribuir para essa não identificação foi a já citada qualidade inferior das imagens.

4.3.2 Ensaios de dureza

Após o término das medições alguns gráficos foram plotados para a comparação dos resultados obtidos no laboratório da UTFPR com os resultados de Avinash et al (2007) e Palanivel et al (2017), que fizeram testes semelhante com o titânio grau 5 e 2, respectivamente. A Figura 40 demonstra graficamente o perfil de dureza da amostra sete, desde o centro da solda até 2,7 mm de distância.

Figura 40: Dureza no sentido longitudinal (eixo x), amostra 7.



Fonte: Autoria própria.

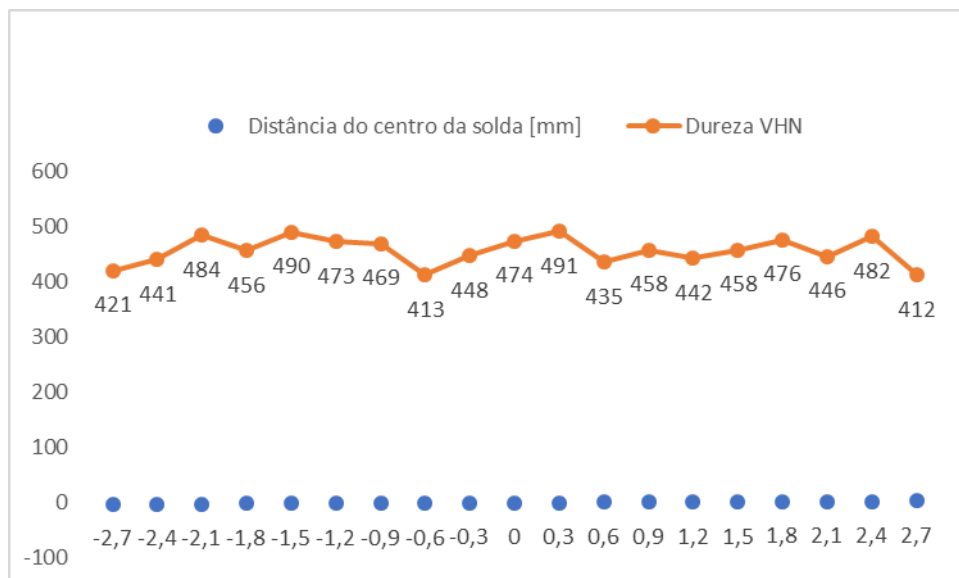
A compilação dos testes de dureza demonstrou coerência com a literatura quanto ao perfil da curva de dureza. Como afirmado por ambos os autores, a dureza manteve-se maior no centro da solda, região onde alcançaram as maiores temperaturas, maiores refinamentos de grãos e maior influência da força de forja, decrescendo à medida que se afasta do centro de solda. Embora o gráfico longitudinal da amostra 7, se comparado aos artigos usados de embasamento, evidenciaram uma distribuição melhor e mais linear da dureza ao longo do corpo de prova. Em relação

as valores da distribuição de dureza, houve uma certa discrepância com os valores de Avinash que variaram 60 pontos na escala Vickers indo de 370VHN, da periferia, até 430VHN, no centro da solda. Já os valores encontrados nesse estudo, oscilaram 108 pontos indo de 356VHN da periferia até 474VHN no centro. As possíveis razões das discrepâncias dos valores obtidos entre os estudos podem estar relacionadas a alguma(s) da(s) hipótese(s) levantada(s) a seguir:

- Parâmetros de ensaio de microdureza feitos por Avinash et al (2007) são desconhecidos
- Diferentes parâmetros de soldagem como: rotação, espessura da peça, força de forja e força de fricção.
- Alinhamento entre as peças soldadas na literatura.
- Diferentes taxas de transferência de calor devido aos diâmetros serem diferentes.

A Figura 41 ilustra a dureza ao longo da solda, ou seja, radialmente da amostra 7.

Figura 41: Dureza medida radialmente (eixo y)

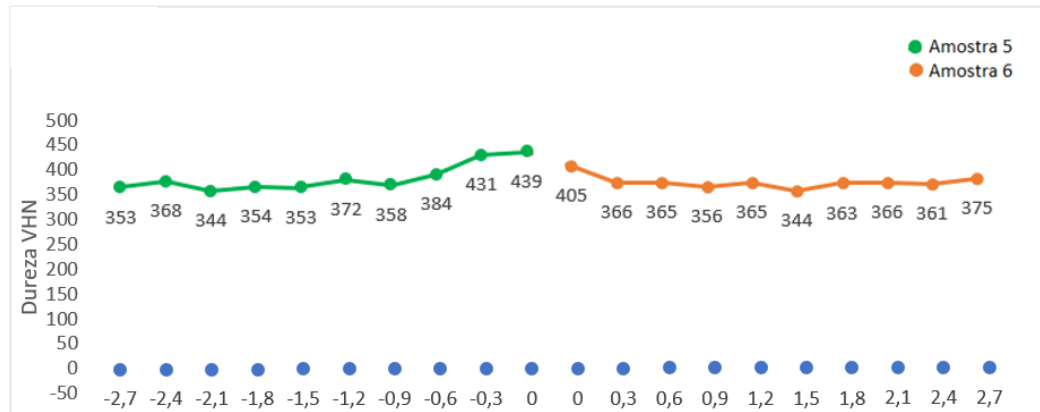


Fonte: Autoria própria.

A dureza medida no sentido radial da solda, apresentou média de 456 Vickers com um desvio padrão de 28, demonstrando ser mais homogêneo nessa região. As amostras 5 e 6, de forma análoga a amostra 7, embora as variações de dureza ao

longo da peça tenham sido menos expressivas, ou seja, a dureza oscilou menos até atingir a periferia da amostra como exemplificado na Figura 42.

Figura 42: microdureza medida longitudinalmente peça 5 e 6



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

Analisando tecnicamente as soldagens por fricção das barras cilíndricas de titânio grau 5 realizadas, pode-se afirmar que é totalmente plausível realizar essa técnica em um torno convencional adaptado, uma vez que os resultados encontrados quanto a resistência a tração, microdureza e metalografia, estiveram de acordo com o que a literatura predizia. Deve-se atentar apenas que o processo proposto apresentou problemas quanto sua replicabilidade devido à falta de alinhamento coaxial entre as peças. Portanto, se o resultado esperado demandar grande precisão geométrica o maquinário deverá ser melhor adaptado, como feito, por exemplo, no estudo de Patel, A e Patel, I (2017). Entretanto, esse empecilho não deixa de abrir espaço para que outros estudos relacionados a soldagem por fricção ocorram, já que um torno convencional é quase que obrigatório em universidades que lecionam engenharia mecânica.

Como o objetivo principal do trabalho foi analisar se soldas de titânio grau 5 teriam uma boa resistência mecânica, podemos afirmar que sim, uma vez que as soldas suportaram em média uma tração de 908 Mpa e a dureza apresentou um aumento de 100 HVN na região central da solda se comparado ao metal de base.

A empresa parceira poderá utilizar os resultados desse trabalho para propor avanços na pesquisa de um processo de fabricação alternativo de seu componente. Como o produto é de aplicação médica, seu barateamento poderia ajudar inúmeras pessoas.

Em trabalhos futuros, poderiam ser abordados outros aspectos da soldagem, como temperatura atingida no centro de solda durante o processo, além da análise de biocompatibilidade do produto final. O parâmetro de aplicação da força axial também poderia ser melhor mensurado, talvez com o auxílio de um pistão hidráulico por exemplo. Adaptações do processo em outras máquinas, dependendo do grau da liga, como em uma furadeira de bancada com rotação suficiente, ou uma fresa. Uma máquina com uma certa portabilidade para esse tipo de solda a tornaria mais flexível, mais difundido e mais usual. Estudar a estanqueidade da solda e a influência dos elementos químicos formados na oxidação superficial quando em contato com o tecido e fluídos humano, seriam de grande valia para a área médica.

A realização desse projeto demandou muito esforço da equipe, principalmente para gerar soluções para os diversos problemas encontrados, como máquinas com avarias, falta dos instrumentos corretos e de experiência prática da equipe em soldagem e usinagem de peças. Os percalços vencidos, de alguma forma, irão fortalecer a formação como engenheiro adicionando mais resiliência e capacidade de resolução de problemas.

REFERÊNCIAS

ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE (Ed.). **Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials**. Asm Intl, 1990.

ATOUI, Juliana Abdallah. **Resistência mecânica e desajuste marginal do titânio comercialmente puro submetido a dois métodos de soldagem: TIG e Laser**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

AVINASH, M. et al. **Microstructure and mechanical behaviuor of rotary friction welded titanium alloys**. In: Proceedings of world academy of science, engineering and technology, 2007.

CALLISTER, William. **Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Grupo Gen-LTC, 2013.

LEYENS, Christoph; PETERS, Manfred. **Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications**. WileyVCH, Köln, 2003.

MACEDO, Haroldo Reis Alves de. **Tratamento térmico do titânio e suas consequências sobre as propriedades físico-químicas e de biocompatibilidade**, 2012.

MAIA, Mário et al. **Reconstrução da estrutura facial por biomateriais: revisão de literatura**. Revista Brasileira de cirurgia plástica, v. 25, n. 3, 2010.

O'BRIEN, Annette; GUZMAN, Carlos (Ed.). **Welding handbook: welding processes**. American Welding Society, part. 3, cap. 7, 2007.

PALANIVEL, R. et al. **Microstructure and mechanical characterization of continuous drive friction welded grade 2 seamless titanium tubes at different rotational speeds**. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2017.

PARK, Joon; LAKES, Roderic S. **Biomaterials: an introduction**. Springer Science & Business Media, 2007.

PATEL, Anantkirtay; PATEL, Jignesh. **Parametric Experiment Analysis of Friction welding of two dissimilar Inconel 718 and SS 304**. International Journal of Advance Engineering and Research Development (IJAERD), Volume 4, Issue 5, 2017.

PINTO, Gilberto Ribeiro Riguetti. **Caracterização de ligas a base de titânio com adição de Nb, Zr, Pd para finalidades biomédicas**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

ROCHA, Rodrigo Mattos Amaral. **Estudo da zona termicamente afetada de soldagem de revestimento de aço 9% Ni com superliga de Ni625 empregando o processo GTAW**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

UDAY, M. B. et al. **Advances in friction welding process: a review**. Science and technology of Welding and Joining, 2010.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio DH. **Soldagem: processos e metalurgia**. Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 1992, cap. 6c.

WOJTASZEK, M. et al. **Quasi-static and dynamic tensile properties of Ti-6Al-4V alloy**. Archives of Metallurgy and Materials, v. 58, n. 4, p. 1261-1265, 2013.