

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
BACHARELADO ENGENHARIA QUÍMICA

CAIO YABIKU

ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE PROCESSO POR ATRITO
(*FRICTION SURFACING*) DA LIGA DE ALUMÍNIO AA2024-T3
PELO MÉTODO DE TAGUCHI

PONTA GROSSA
2021

CAIO YABIKU

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE PROCESSO POR ATRITO
(*FRICITION SURFACING*) DA LIGA DE ALUMÍNIO AA2024-T3
PELO MÉTODO DE TAGUCHI**

Trabalho de Conclusão de Curso 2 apresentado como requisito à obtenção do título de Bacharel, em Engenharia Química, do Departamento de Engenharia Química, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa.

Orientadora: Prof. Dra. Juliana de Paula Martins.

Coorientador: Prof. Dr. André Luís Moreira de Carvalho.

PONTA GROSSA

2021



4.0 Internacional

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



TERMO DE APROVAÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC

ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE PROCESSO POR ATRITO (*FRICTION SURFACING*) DA LIGA DE ALUMÍNIO AA2024-T3 PELO MÉTODO DE TAGUCHI

Por: Caio Yabiku

Monografia apresentada às 16 horas 0 minuto do dia 03 de dezembro de 2021, como requisito parcial, para conclusão do Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação e conferidas, bem como achadas conforme, as alterações indicadas pela Banca Examinadora, o trabalho de conclusão de curso foi considerado APROVADO.

Banca examinadora:

Amanda Catarina Brandes	Membro
João Paulo Gabre Ferreira	Membro
Prof. Dra. Juliana de Paula Martins	Orientador
Prof. Dr. André Luís Moreira de Carvalho	Coorientador
Prof. Dra. Juliana de Paula Martins	Professora responsável TCCII

A Folha de Aprovação assinada encontra-se arquivada na Secretaria Acadêmica.

RESUMO

YABIKU, Caio. **Análise dos Parâmetros de Processo por Atrito (*Friction Surfacing*) da Liga De Alumínio AA2024-T3 pelo Método de Taguchi**. 2021. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado de Engenharia Química – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

O seguinte projeto tem como objetivo a obtenção dos melhores parâmetros de processo para a deposição superficial por atrito para aplicação na fabricação e no reparo de alguns componentes estruturais de aeronaves. Este processo é vantajoso, pois serve como uma alternativa ao processo de deposição por fusão dos materiais, deste modo, materiais que não apresentam afinidade metálica podem ser unidos por um processo de deposição à frio. Nesse trabalho, foram avaliados os valores de força axial, velocidade de avanço e velocidade de rotação para um substrato e haste consumível de alumínio AA2024-T3. Para a obtenção da melhor adesão possível sob diferentes substratos e consumíveis é necessário a melhor adequação dos parâmetros envolvidos no processo. Contudo, os efeitos destes parâmetros são complexos e os resultados tendem a não serem lineares, sendo dependentes da combinação dos materiais. Portanto, para cada caso específico é necessário um estudo aprofundado para analisar a influência dos processos de parâmetros. Para o tratamento dos dados destes foi utilizado um programa computacional chamado de *Minitab*, fornecendo tabelas e gráficos para a análise dos resultados. Além de encontrar os melhores parâmetros para a deposição superficial por atrito, também foram encontrados a influência desses parâmetros na largura e espessura da deposição. Uma força axial elevada implica numa diminuição da espessura da deposição, também foi verificado que uma velocidade de avanço alta implica na diminuição da largura e da espessura do depósito. Em relação à velocidade de rotação, foi observado que seu aumento implica num aumento de largura, porém, numa diminuição de espessura, então é necessário um valor intermediário para não comprometer a deposição.

PALAVRAS-CHAVE: Deposição superficial por atrito. Parâmetro de processo. Liga de alumínio AA2024-T3.

ABSTRACT

YABIKU, Caio. **Analysis of the Process Parameters by Friction Surfacing of the Aluminum Rod AA2024-T3 by Taguchi's Method.** 2021. 56 p. Work of Conclusion Course Graduation in Chemistry Engineering – Federal Technology University. Ponta Grossa, 2021.

The following project aims to obtain the best process parameters for Friction Surfacing for application in the manufacture and repair of some aircraft structural components. This process is useful, because is an alternative process of the deposition by fusion the materials, thus, materials that do not have metallic affinity can be joined by a cold deposition process. In this work, the best values of axial force, feedrate and rotational speed were evaluated for substrate and consumable rod made of aluminum AA2023-T3. To obtain the best possible adherence on different substrates and consumables is necessary to adjust the parameters involved in the process. However, the effects of these parameters are complex and the results tend not to be linear, being dependent on the combination of materials. Therefore, for each specific case an in-depth study is needed to analyze the influence of the parameters process. For the treatment of data, a computer program called *Minitab* was used, providing tables and graphs to the analysis of the results. In addition to finding the best parameters for Friction Surfacing, the influence of these parameters on the deposition width and thickness was also found. A high axial force implies a decrease in the deposition thickness, it was also found that a high feed rate implies a decrease in the width and thickness of the deposit. About the rotation speed, it was observed that its increase implies a growth in width, but a decrease in thickness, so, an intermediate value is necessary to not compromise the deposition.

KEYWORDS: Friction Surfacing. Process Parameters. Aluminum Alloy AA2024-T3.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Partículas precipitadas em liga de alumínio AA2024-T3	16
Figura 2 – Representação das distorções causadas pela presença de precipitados com os tipos de interface	17
Figura 3 - Processo de soldagem por fricção rotativa.....	19
Figura 4 - Sistema esquemático das condições de operação durante as fases de processo de soldagem por atrito	21
Figura 5 - Peça na fase I do processo de soldagem por atrito.....	22
Figura 6 - Peça na fase II do processo de soldagem por atrito.....	22
Figura 7 - Processo de deposição superficial por atrito	25
Figura 8 – Microestrutura de uma liga AA6082-T6 sobre AA2024-T3	26
Figura 9 – Macrografia da região de solda fria	27
Figura 10 - Efeito da força axial na interface de deposição	29
Figura 11 - Efeito da força axial na profundidade da zona termicamente afetada (ZTA).....	30
Figura 12 - Efeito da força axial na resistência a tração	30
Figura 13 - Efeito da velocidade de rotação na largura e na rugosidade da superfície de deposição	31
Figura 14 - Efeito da Velocidade de Rotação na resistência a tração.....	32
Figura 15 - Efeito da velocidade de avanço a largura e espessura do depósito	33
Figura 16 - Falhas proveniente de um processo de deposição por atrito com velocidades de avanço não adequadas	33
Figura 17 - Método tradicional X Método Taguchi	34
Figura 18 - Exemplo de Matriz Ortogonal.....	35
Figura 19 - Exemplo de Matriz Ortogonal com Resultados	36
Figura 20 - Tabela dos Totais de Resposta de cada Nível para cada Fator	36
Figura 21 - Tabela dos Valores Médios e Classificação da diferença entre Níveis de cada Fator	37
Figura 22 - Material utilizado no processo de deposição superficial por atrito	38
Figura 23 - Máquina utilizada no processamento de deposição superficial por atrito.....	39
Figura 24 - Efeito dos fatores sobre a média da largura efetiva do primeiro experimento	45
Figura 25 - Efeito dos fatores sobre a média da espessura efetiva do primeiro experimento	46
Figura 28 - Efeito dos fatores sobre a média da largura efetiva do segundo experimento	49
Figura 29 - Efeito dos fatores sobre a média da espessura efetiva do segundo experimento	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Propriedades do alumínio puro	11
Quadro 2 - Composição das diferentes séries de liga de alumínio para trabalho mecânico	11
Quadro 3 - Especificações da adição de elementos na liga de alumínio	12
Quadro 4 - Especificações do tratamento térmico	14
Quadro 5 - Tipos de processos de soldagem por atrito	20
Quadro 6 - Composição química específica e analisada da liga de alumínio AA2024-T3.....	38
Quadro 7 - Matriz do primeiro experimento	40
Quadro 8 - Níveis dos parâmetros do primeiro experimento	40
Quadro 9 - Matriz do segundo experimento	41
Quadro 10 - Níveis dos parâmetros do segundo experimento.....	41
Quadro 11 - Resultados do primeiro experimento	44
Quadro 12 - Dados resposta da largura efetiva pela média do primeiro experimento	45
Quadro 13 - Dados resposta da espessura efetiva pela média do primeiro experimento	46
Quadro 14 - Resultados do segundo experimento	48
Quadro 15 - Dados resposta da largura efetiva pela média do segundo experimento	49
Quadro 16 - Dados resposta da espessura efetiva pela média do segundo experimento	50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 REVISÃO DA LITERATURA	10
2.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS	10
2.1.1 Tratamentos Térmicos	12
2.1.2 Propriedades e Aplicações da Série 2XXX.....	14
2.1.3 Liga AA2024-T3	15
2.2 SOLDAGEM POR ATRITO	17
2.2.1 Breve Histórico.....	17
2.2.2 Visão Geral	18
2.2.3 Fases do Processo	20
2.3 PROCESSO DE DEPOSIÇÃO SUPERFICIAL POR ATRITO – FRICTION SURFACING (FS)	24
2.3.1 Breve Histórico.....	24
2.3.2 Visão Geral	24
2.3.3 Vantagens e Desvantagens dos Métodos	27
2.4 PARAMETROS DE PROCESSO DO FS	29
2.4.1 Força Axial (F)	29
2.4.2 Velocidade de Rotação (VR)	31
2.4.3 Velocidade de Avanço (VA)	32
2.5 MÉTODOS DE TAGUCHI	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1 MATERIAIS	38
3.2 MÉTODOS	39
3.2.1 Processo de Deposição Superficial por Atrito	39
3.2.2 Análise dos Parâmetros de Processo pelo Método de Taguchi	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 ANÁLISE DE TAGUCHI DO PRIMEIRO EXPERIMENTO APLICADO NA OBTENÇÃO DOS MELHORES PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO	44
4.1.1 Efeito dos fatores/níveis para o primeiro experimento	45
4.2 ANÁLISE DE TAGUCHI DO SEGUNDO EXPERIMENTO APLICADO NA OBTENÇÃO DOS MELHORES PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO	47
4.2.1 Efeito dos fatores/níveis para o segundo experimento	48
5 CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é o elemento químico metálico mais abundante da crosta terrestre, representando cerca de 8% de toda a superfície terrestre, porém, é o mais recente dos metais comuns a se tomar conhecimento. Isto se deve ao fato de que ele não aparece na sua forma natural metálica no meio ambiente, sua afinidade com, principalmente, o oxigênio, faz com que se encontre óxidos duros na crosta terrestre, como a alumina (Associação Brasileira do Alumínio, 2017).

A ampla utilização no cotidiano é consequência das características naturais deste metal, sendo um material: leve; excelente condutor de calor; possui boa moldabilidade e soldabilidade, sendo viável a aplicação para os setores que envolvem o processo de soldagem (OLIVEIRA, 2009).

Neste contexto, o alumínio é muito consumido em diversos ramos do setor de metalurgia, como as indústrias naval, automotiva e aeronáutica. Porém, os processos de soldagem e revestimentos de chapas que ocorrem fusão dos materiais, chamados de processos à quente, não são eficazes para a deposição em uma peça de alumínio AA2024-T3, pois acabam apresentando alta probabilidade de trincas na solidificação e trincas à quente devido à alta diferença do gradiente de temperatura do resfriamento da solda (MODENESI; MARQUES, 2000; Associação Brasileiro do Alumínio, 2017; FIORAVANTI, 2008).

A utilização desta liga é grande na indústria aeronáutica devido às suas características de elevada razão de resistência mecânica\peso, resistência à corrosão e alta ductilidade. Porém, como os processos à quente não são utilizáveis para a deposição de uma liga AA2023-T3, surge o problema: como utilizar esta liga nos aviões da indústria aeronáutica nas melhores condições possíveis visando o reparo das chapas de alumínio, e consequentemente evitando seu descarte?

Como um processo alternativo aos tradicionais processos de revestimento, como o processo de revestimento contínuo por imersão a quente, onde a temperatura é elevada ao ponto de ocorrer a fusão dos materiais, surge o *Friction Surfacing* (FS), também conhecido como processo de deposição superficial por atrito. Este processo não ocorre fusão (processo no estado sólido) entre o substrato (chapa de alumínio) e a haste consumível, ele consiste no aquecimento por atrito entre a haste consumível em rotação e a chapa. Inicialmente a haste consumível é

submetida a uma rotação e aplicação de uma carga axial, para posterior contato com o substrato. Com as condições de pressão e temperatura, uma camada plasticamente deformada é formada e com um movimento transversal do substrato ou da haste ocorre a deposição (GRANDA et. al, 2013; GALVIS et. al, 2017).

Este processo é vantajoso porque permite a combinação dos materiais metálicos que não possuem afinidade metálica, minimiza desperdícios e diminui custos de produtividade, pois ocorre o reparo das chapas de alumínio que se desgastaram a ponto de surgir trincas, recuperando este material que seria descartado e substituído (GRANDA et. al, 2013; GALVIS et. al, 2017).

Além disso, o procedimento de deposição superficial por atrito é pertinente porque a indústria aeronáutica mostra interesse em incentivar estas pesquisas, como mostra na formação do convenio de cooperação científica e tecnológica entre empresas, universidades e instituições de apoio, o Consorcio de P&D em Processamento por Atrito (C2PA).

Portanto, é fundamentado que os parâmetros de processo de deposição superficial por atrito influenciam nas características mecânicas e micro estruturais dos depósitos. Com isso, surge o objetivo geral de definir os melhores parâmetros de processo (força axial, velocidade de rotação e velocidade de avanço) para o método de deposição por atrito num substrato e haste consumível de alumínio AA2024-T3, de modo que a tecnologia possa ser aplicada nos processos de fabricação e reparo de alguns componentes estruturais de aeronaves em superfícies resistentes à corrosão, ao desgaste e a formação de trincas por fadiga.

Em relação aos objetivos específicos, estes foram estabelecidos: encontrar a matriz dos ensaios dos experimentos, obter gráficos relacionados com a espessura efetiva e a largura efetiva dos depósitos e encontrar se é possível verificar influência dos parâmetros nos resultados obtidos.

Para o tratamento dos dados foi utilizado o Método de Taguchi, método que busca encontrar resultados para um valor algo, o que difere dos métodos estatísticos tradicionais, que buscam resultados dentro de um intervalo de valores. Para a facilitação do tratamento dos dados foi utilizado um *software*, o *Minitab*, que permite a automatização da geração de gráficos e de dados de respostas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio, elemento metálico mais abundante do nosso planeta, foi descoberto recentemente comparado com outros metais, como o cobre e o ferro, que possuem registros desde a antiguidade (a.C.). Isto se deu pois ele é geralmente encontrado no ambiente em formas de óxidos, como no minério bauxita, o que dificultou a caracterização do alumínio (MENDES, 2000).

Devido a esta alta compatibilidade do alumínio, foi apenas em 1808, que um químico britânico chamado Humphrey Davy conseguiu provar a existência deste novo elemento químico e o nomeou de *aluminum*, porém, somente em 1924 que o cientista dinamarquês Hans Christian Oersted conseguiu isolá-lo na forma que é conhecido atualmente. O primeiro processo com sucesso de se obter alumínio industrialmente por via química se deu no ano de 1854, por um físico e químico dinamarquês chamado Hans Christian Oersted (BALANÇO MINERAL BRASILEIRO, 2001).

As características naturais do alumínio o tornam muito utilizável no cotidiano, sendo um material: leve, onde consome menos combustível nos meios de transporte e é viável para utilização em embalagens alimentícias; excelente condutor térmico e de eletricidade, sendo favorável para indústrias que necessitam de um bom condutor térmico; possui boa moldabilidade e soldabilidade, sendo viável a aplicação para os setores que envolvem o processo de soldagem; impermeabilidade e opacidade, propriedades essenciais para a utilização em alimentos e medicamentos; alta relação resistência\peso, oferecendo um desempenho mecânico ótimo comparado com o peso do material; além de muitos outros atributos vantajosos, como a durabilidade, dureza, resistência à corrosão e principalmente a alta possibilidade de reciclagem (OLIVEIRA, 2009).

No Quadro 1 é possível observar as propriedades físicas e mecânicas do elemento químico alumínio puro:

Quadro 1 – Propriedades do alumínio puro

Peso específico (g/cm ³)	2,70
Módulo de elasticidade (kg/mm ²)	7030
Tensão de fadiga	25-50%
Temperatura de fusão (°C)	660°C
Limite de escoamento (MPa)	12,7
Limite a resistência a tração (MPa)	48
Dureza (HB)	40-50

Fonte: GGD Metals (2015).

As ligas de alumínio são classificadas e divididas em dois grandes grupos: as ligas mecanicamente trabalhadas (exemplo: extrusão, laminação) e as ligas que são submetidas a fusão (OLIVEIRA, 2009).

As ligas destinadas ao trabalho mecânico (ligas que serão utilizadas neste projeto) adotam um sistema de designação internacional conforme estipulado pela *Aluminum Association* (AA), possuindo uma classificação de quatro dígitos. O primeiro dígito representa o elemento primário da liga, conforme Quadro 2, onde se esta for composta apenas por alumínio, é dada pela série 1XXX. O segundo dígito corresponde as modificações realizadas no material, onde se este for original, é dado pelo dígito 0 e os materiais alterados são dados números de 1-9. Estas transformações são controladas e registradas pela própria AA, exigem uma documentação específica para cada tipo mudança. O terceiro e o quarto dígito do sistema é referente ao grau de pureza da liga, onde os valores vão de 99% até 100%, por exemplo, a liga 6351 possui uma pureza de 99,51% e a liga 1200 possui uma pureza de 99% (NASCIMENTO, 2005; OLIVEIRA, 2009).

Observa-se que a nomenclatura vem acompanhada de um 'AA' antes dos quatro dígitos, indicando a associação que é responsável por esta classificação. No Quadro 2, é exposto os 9 elementos principais existentes nas ligas de alumínio:

Quadro 2 – Composição das diferentes séries de liga de alumínio para trabalho mecânico

Série	Liga(s) principal(is)	Outros elementos de liga
1XXX	Alumínio puro	-
2XXX	Cobre	Magnésio, Lítio
3XXX	Manganês	Magnésio
4XXX	Silício	-
5XXX	Magnésio	-
6XXX	Magnésio, Silício	-
7XXX	Zinco	Cobre, Magnésio, Cromo, Zircônio
8XXX	Lítio, Estanho, Ferro, Cobre, Manganês	-
9XXX	Reservada para uso futuro	

Fonte: Nascimento (2005).

Uma relação entre os elementos químicos que podem ser adicionados na liga está apresentada no Quadro 3, juntamente com as suas características e aplicações no mercado:

Quadro 3 – Especificações da adição de elementos na liga de alumínio

Elemento adicionado	Características	Aplicações
Alumínio puro	Ductilidade, condutividade elétrica e térmica, resistência à corrosão	Embalagens, folhas muito finas, recipientes p/ a indústria química, condutores elétricos
Cobre	Resistência mecânica, resistência a altas temperaturas e ao desgaste, usinabilidade	Rodas de caminhões, rodas, estrutura e asas de aviões, cabeçotes de cilindros de motores de aviões e caminhões, pistões e blocos de cilindros de motores
Manganês	Ductilidade, melhor resistência mecânica à corrosão	Esquadrias para construção civil, recipientes para a indústria química
Silício	Baixo ponto de fusão, melhor resistência à corrosão, fundibilidade	Soldagem forte, peças fundidas
Silício com cobre ou magnésio	Resistência mecânica ao desgaste e à corrosão, ductilidade; soldabilidade, usinabilidade, baixa expansão térmica	Chassis de bicicletas, peças de automóveis, estruturas soldadas, blocos e pistões de motores, construção civil
Magnésio	Resistência à corrosão em atmosferas marinhas, soldabilidade, usinabilidade	Barcos, carrocerias de ônibus, tanques criogênicos
Zinco	Alta resistência mecânica e baixo peso	Partes de aviões
Zinco e magnésio	Resistência à tração e à corrosão, soldabilidade, usinabilidade	Brasagem
Estanho.	Resistência à fadiga e à corrosão por óleo lubrificante	Capa de mancal, mancais fundidos, bielas

Fonte: Instituto Federal de Santa Catarina (2009).

2.1.1 Tratamentos Térmicos

As ligas de alumínio também podem ser separadas em ligas tratáveis termicamente e ligas não tratáveis: as séries 2XXX, 6XXX e 7XXX são endurecidas por tratamento térmico, onde são realizados processos de aquecimento e resfriamento controlados com o intuito de melhorar a dureza e a resistência mecânica do produto final; as séries 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX não são tratáveis termicamente, porém, podem ter suas propriedades melhoradas utilizando um processo de deformação a frio (encruamento) (RODRIGUES, 2015).

De acordo com o tratamento que ela sofre, uma nomenclatura diferente é colocada separada por um hífen, como por exemplo, AA5083-O. Em seguida, a relação de cada nomenclatura com o seu respectivo tratamento é especificada (RODRIGUES, 2015; ABREU, 2016):

- F – Ligas originais: produto onde não há nenhum tipo de controle de temperatura ou de encruamento durante o processo de conformação da peça;
- O – Ligas recozidas: utilizada antes do processo de encruamento (trabalho a frio), onde o objetivo é deixar a estrutura da liga com uma menor resistência mecânica, é realizado em produtos já tratados, também podem ser usados para elevar a ductilidade e a estabilidade dimensional da liga;
- H – Ligas encruadas: esta nomenclatura é destinada para as ligas que sofreram trabalho mecânico a frio, que são responsáveis por distorções no reticulado, onde juntamente com as discordâncias existentes e as tensões das interações entre estes desacordos são as principais fontes de melhoria na dureza e na resistência mecânica da liga;
- W – Ligas solubilizadas: com o intuito de colocar em solução sólida a maior parte de átomos da liga, sendo utilizado para os materiais que apresentam um envelhecimento natural após o tratamento. É indicado pois o envelhecimento ocorre a uma temperatura mais baixa, necessitando um controle de temperatura e tempo para atingir valores de dureza mais elevados;
- T – Ligas tratadas termicamente: ocorre um processo térmico visando melhorar as propriedades físicas e mecânicas da liga, é classificada pela letra 'T' seguido de um ou mais dígitos dependendo da especificação necessária.

Além desses tratamentos específicos que possuem nomenclaturas, existem processos térmicos envolvidos nesses tratamentos que são importantes ressaltar:

- Homogeneização tem a intenção de reduzir as segregações, criando estruturas mais estáveis e com uma distribuição de átomos mais homogênea, desse modo, é possível o controle de algumas propriedades mecânicas (tamanho de grão, ductilidade) (PHILIPSON; OLIVEIRA,2002);
- Solubilização é um processo que uma condição de aquecimento em temperatura elevada é realizada através do aumento dos coeficientes de difusão dos

elementos de liga, com o intuito de obter precipitados formados de forma controlada, seja em relação ao tamanho ou à sua coerência com a matriz (FREITAS, 2014);

- Envelhecimento tem como objetivo a formação de precipitados dissolvidos na matriz durante o tratamento de solubilização, desse modo, os precipitados se tornam refinados e elevam a dureza do material (VERRAN; MORAES; VERRI, 2005).

No Quadro 4, as especificações do tratamento térmico com a nomenclatura são demonstrados:

Quadro 4 – Especificações do tratamento térmico

Tipo de tratamento	Especificação do tratamento
T1	Conformado em alta temperatura e envelhecido naturalmente
T2	Conformado em alta temperatura, resfriado, deformado a frio e envelhecido naturalmente
T3	Solubilizado totalmente, deformado a frio e envelhecido naturalmente
T4	Solubilizado e envelhecido naturalmente
T5	Conformado em alta temperatura e envelhecido naturalmente
T6	Solubilizado e envelhecido artificialmente
T7	Solubilizado e estabilizado
T8	Solubilizado, deformado a frio e envelhecido artificialmente
T9	Solubilizado, envelhecido artificialmente e trabalhado a frio
T10	Conformado em alta temperatura, resfriado, trabalhado a frio e envelhecido artificialmente

Fonte: Abreu (2016).

Se houver dois dígitos ou mais após o TX, este pode estar relacionado com redução da espessura oriunda da deformação a frio (T68 significado que foi realizado um tratamento T6 e foi diminuída em 8% sua espessura), também pode ser referente com o tipo de diminuição de tensões (TX51 é por tração, TX52 é por compressão e TX53 é o alívio de tensões) ou então pode ser um indicativo de algum tratamento térmico auxiliar realizado pelo operador (NASCIMENTO, 2005).

2.1.2 Propriedades e Aplicações da Série AA 2XXX

De acordo com Xiao et al. (2002) e Nafsin et al. (2013), as ligas de alumínio da série 2XXX são compostas principalmente por cobre (com porcentagem entre

3,8% e 4,9%) e o magnésio (com porcentagem entre 1,2% e 1,8%). Esses elementos são responsáveis pelo aumento da resistência mecânica. Isto acontece devido a formação de precipitados após o processo de envelhecimento (endurecimento, ou seja, aumento da dureza, por precipitação de partículas), entrando de maneira ordenada e dispersa na matriz, desse modo funcionam como uma barreira no movimento das discordâncias (ABREU, 2016; CASELATTO, 2016).

Além disso, a presença de cobre também implica no beneficiamento de propriedades relacionadas com a fadiga e ainda é responsável pelo aumento da resistência mecânica em temperaturas altas (ABREU, 2016; CASELATTO, 2016).

Porém, este elemento químico adicional também influencia negativamente a resistência a corrosão da liga, segundo Girisha e Sharma (2012), o cobre tem uma disposição de deposição em torno dos contornos dos grãos formados durante a recristalização, o que faz com que o metal seja propenso a corrosão.

Conforme ASM Metal Handbook (2000), as ligas que possuem em sua composição Al-Cu-Mg são indicadas para peças estruturais de aeronaves que necessitam de uma elevada relação entre resistência mecânica e peso, são aplicadas geralmente na fuselagem na indústria aeronáutica e no revestimento da estruturação das asas das aeronaves.

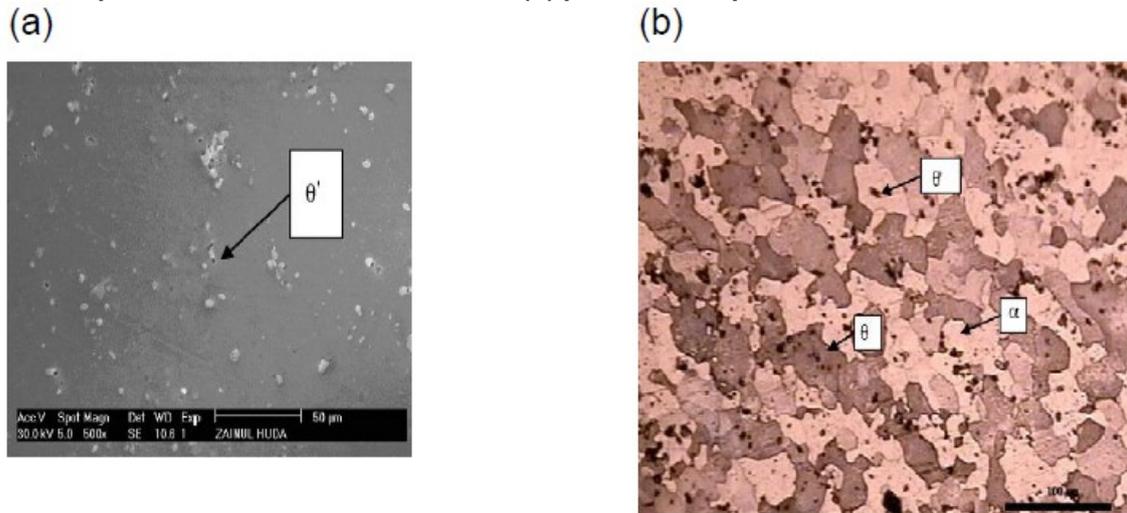
2.1.3 Liga AA2024-T3

A liga possui propriedades que proporcionam uma boa soldabilidade, moldagem e capacidade de revestimento com desejado acabamento. Foi desenvolvida pela necessidade de materiais mais leves e ainda resistentes para a utilização na indústria aeronáutica (TOBIAS; SILVA; MELO, 2012).

O tipo de tratamento térmico realizado é o T3, onde inicialmente ocorre a solubilização total da liga, em seguida, o material sofre uma têmpera (resfriamento brusco) até a temperatura ambiente, com o intuito de se obter uma matriz homogênea de cobre em alumínio e seguido de deformação plástica (trabalho a frio, com temperaturas abaixo da temperatura de recristalização). Posteriormente, ocorre o envelhecimento natural do material, onde se inicia as precipitações das fases de transição, que se tornarão fases de equilíbrio (ABREU, 2016).

Na Figura 1, é possível verificar imagens detalhadas da liga, na da esquerda por Microscopia Eletrônica de Varredura e na da direita por Microscópio Ótico.

Figura 1 – Partículas precipitadas em liga de alumínio AA2024-T3. Em (a) obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura e em (b) por Microscópio Ótico



Fonte: Adaptado de Mascagani (2009)

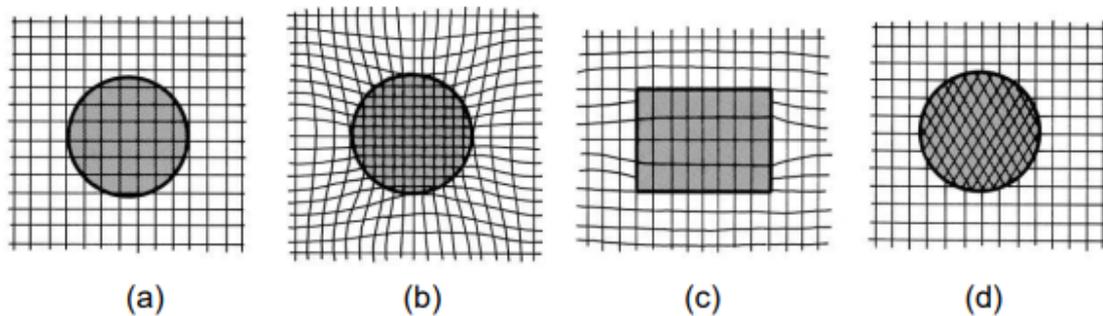
A adição de Magnésio (Mg) é pertinente pois este elemento acelera o envelhecimento natural, aumentando a resistência a tração e, conseqüentemente, intensifica o processo de endurecimento da liga AA2024 (1,5% de Mg). Assim, segundo Liu e Kulak (2000), os valores de tensão de escoamento aumentam em 20% comparando com a liga antecessora, a AA1017 (0,5% de Mg).

Porém, por possuir essa alta porcentagem de Mg, além de beneficiar o endurecimento por precipitação, chamado de fase θ (Al_2Cu) e fase S (Al_2CuMg). Este elemento químico também contribui para a precipitação de partículas intermetálicas de Al-Cu-Mg, que não participam do endurecimento da liga diretamente, são posteriormente transformadas em outras fases, como a própria fase θ e fase S (ABREU, 2016).

A fase de equilíbrio θ é oriunda de um processo de aumento de temperatura de envelhecimento, onde o material se transforma em fragmentos com estruturas cristalinas diferentes da liga sólida. Assim, quando o processo de endurecimento se inicia, ocorrem deformações nas linhas de discordância, o que implica numa restrição da movimentação e, por conseguinte, aumento da dureza do material (HATCH, 1983).

A Figura 2 indica um esquema dos tipos de interface de distorções que são gerados na rede cristalina com a presença de precipitados, estes tipos podem ser: coerente, coerente com distorções, semi-coerente e incoerente.

Figura 2 – Representação das distorções causadas pela presença de precipitados com os tipos de interface: (a) coerente; (b) coerente com distorção; (c) semi-coerente; e (d) incoerente



Fonte: Magalhães (2017)

Já a fase de equilíbrio S, se forma no processo de solidificação e não são dissolvidos e solubilizados pelos processos de tratamento posteriores. Segundo Wang e Starink (2007), a formação da fase S nas ligas de alumínio que possuem Al-Cu-Mg durante o envelhecimento é mais importante para as melhorias das características mecânicas do que os precipitados oriundos da fase θ .

As partículas indesejáveis que são formadas entre os elementos químicos Al-Cu-Mg são circulares e, na maioria, são menores do que as partículas intermetálicas de Al-Cu-Mg-Fe. Além disso, pode se unir a composição Silício e Manganês, o que torna a conduta das partículas muito complexa, possuindo diferentes potenciais em relação a matriz, desse modo, surge pilhas de ação local, levando sobretudo a redução da resistência a corrosão (ABREU, 2016; BUGARIN, 2017).

De acordo com Matrukanitz (1990), como a liga 2024 é endurecida por precipitação, conforme o tratamento térmico aplicado, conseqüentemente, torna-se mais complexo o processo de soldagem. Isto ocorre, pois, a liga é suscetível ao desenvolvimento de trincas em processos a quente e diminuição de resistência mecânica no local da solda.

2.2 SOLDAGEM POR ATRITO

2.2.1 Breve Histórico

A origem dos processos de soldagem por atrito se deu no final do século 19, quando a primeira patente foi declarada em 1891 por J. H. Bevington (Patent nº

444721A-USA), onde foi desenvolvido uma metodologia de soldagem de tubos através do calor provocado entre um componente fixo e uma peça de aço rotativa (CROSSLAND,1971).

Já no século 20, o processo foi se popularizando na Europa, em 1924, por W. Ritcher foi patenteado o processo de soldagem por fricção na Inglaterra e, em 1929, pelo mesmo cientista na Alemanha (Patent nº 477084 – Alemanha). Posteriormente, em 1941, por Klopstock e Neelands, o quarto processo de patente foi reivindicado, porém, foi o primeiro a colocar em pauta o processo de deposição por atrito visando o revestimento de peças, o novo processo não obteve grande aceitação (CROSSLAND,1971).

Entretanto, a primeira aplicação industrial se deu apenas na década de 50, onde o processo foi utilizado como reparos para componentes metálicos desgastados. A difusão do processo de soldagem por atrito se deu pelo maquinista russo A. J. Churikov, que estudou a aplicação do processo em larga escala e patenteou seu processo em 1956. Nos anos seguintes os estudos foram progredindo, atingindo o sucesso na construção do primeiro equipamento de soldagem a frio, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Científicas para Equipamentos de Soldagem da ex-União Soviética (CROSSLAND, 1971).

Com o passar dos anos, a soldagem por atrito foi se desenvolvendo gradativamente, com isso, diversos processos alternativos surgiram, entre eles: soldagem por fricção e mistura (Friction Stir Welding), soldagem por fricção linear (Linear Friction Welding), soldagem por fricção com pino consumível (Friction Hydro Pilar Processing), processo de deposição superficial por atrito (Friction Surfacing), entre muitos outros existentes (PEREZ, 2016).

2.2.2 Visão Geral

No método de soldagem por fricção rotativa, as peças que serão unidas são fixadas num equipamento de soldagem e um dos materiais é colocado em movimento de rotação, enquanto a outra permanece fixa. Posteriormente, quando a peça atingir a rotação desejada, se inicia o contato entre a peça em movimento e a peça fixa, sob ação de uma força de compressão que é aplicada contra as peças, isso faz com que ocorra o atrito, convertendo energia mecânica em energia térmica, desse modo, o material entra em um processo de aquecimento e suas partículas se

deformam plasticamente. Quando o processo se completa, há formação de uma rebarba (sobra não aproveitada da liga) da liga de menor temperatura de fusão, que é a liga que se deforma. Em seguida, a rotação é interrompida e se inicia um processo que se chama de forjamento, onde a força de compressão promove o contato e garante maior adesão da junta (TAVARES, 2017; PEREZ, 2016).

No final do processo, no último estágio, temos uma solda consolidada, principalmente por processos que ocorrem difusão atômica (transporte de matéria induzido por agitação térmica) na interface de contato das peças, isto propicia uma forte ligação metalúrgica entre as peças, soldando-as (PEREZ, 2016).

Na Figura 3, segue uma representação gráfica do processo para facilitar o entendimento:

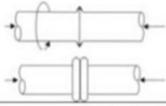
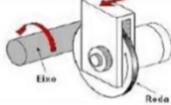
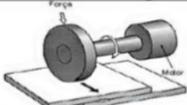
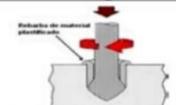
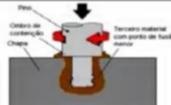
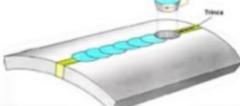
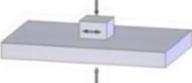
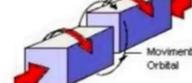
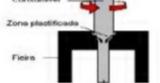
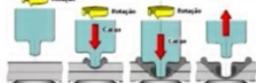
Figura 3 – Processo de soldagem por fricção rotativa. (a) uma das peças é colocada em rotação, (b) contato sob ação de uma força axial, (c) processo de soldagem e (d) a solda é completada



Fonte: Adaptado de Modenesi e Marques (2000)

Existem diversos tipos de soldagem por atrito, como mencionado anteriormente, no Quadro 5, segue uma relação da maioria dos tipos de processos de soldagem por atrito:

Quadro 5 – Tipos de processos de soldagem por atrito

<p>Soldagem por Fricção por Arraste Contínuo ou por Inércia (Rotary Drive Friction Welding)</p> 	<p>Soldagem por Fricção Linear (Friction Stir Welding)</p> 	<p>Soldagem de Pino por Fricção (Friction Stud Welding)</p> 
<p>Soldagem por Fricção Radial (Radial Friction Welding)</p> 	<p>Deposição por Fricção (Friction Surfacing)</p> 	<p>Endurecimento por Transformação por Fricção (Friction Transformation Hardening)</p> 
<p>Soldagem por Fricção Com Costura Contínua (Friction Seam Welding)</p> 	<p>Soldagem por Fricção Com Mergulho (Friction Plunge Welding)</p> 	<p>Soldagem por Fricção com Terceiro Corpo (Third-body Friction Welding)</p> 
<p>Soldagem por Fricção por Costura (Friction Stitch Welding)</p> 	<p>Soldagem por Fricção por Ponto Cônico (Friction Taper Stitch Welding)</p> 	<p>Soldagem por Fricção com Pino Consumível (Friction Hydro Pillar Processing)</p> 
<p>Soldagem por Fricção Linear/Angular (Linear/Angular Friction Welding)</p> 	<p>Soldagem por Fricção Orbital (Orbital Friction Welding)</p> 	<p>Brasagem por Fricção (Friction Brazing)</p> 
<p>Extrusão por Fricção (Friction Extrusion)</p> 	<p>Deposição por Fricção e Mistura (Friction Stir Cladding)</p> 	<p>Rebitagem por Fricção (Fricriveting)</p> 
<p>União por Fricção por "Bit" (Friction Bit Joining)</p> 	<p>Soldagem por Fricção por Ponto e Mistura Mecânica (Friction Spot Welding)</p> 	<p>Soldagem por Fricção por Ponto e Mistura Mecânica com Translação (Friction Stir Spot Welding)</p> 

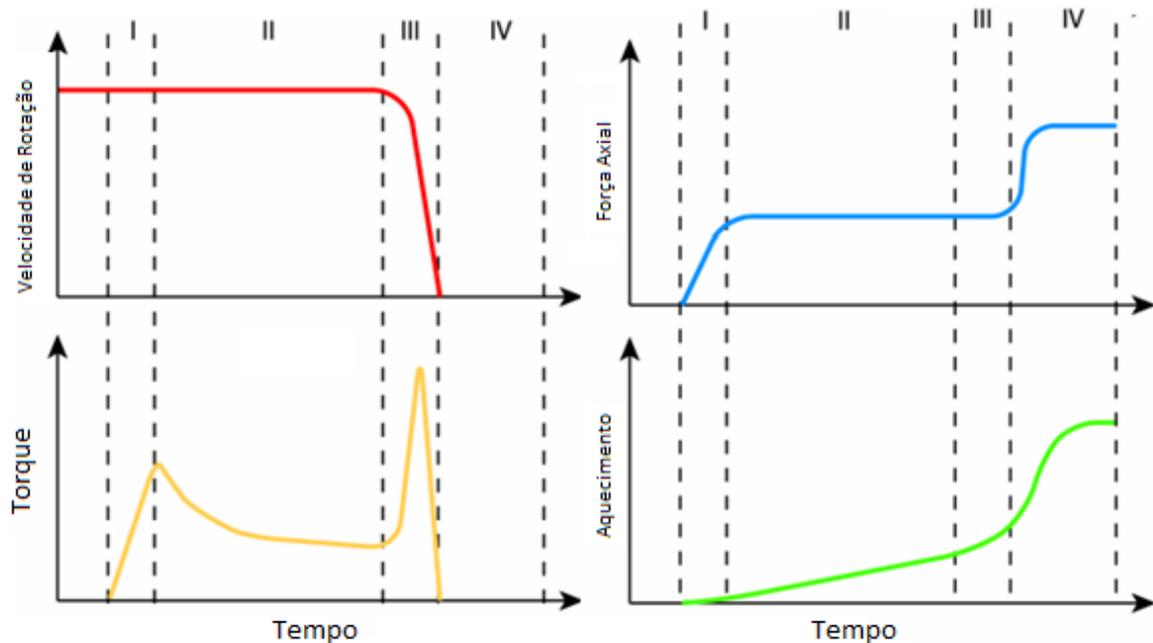
Fonte: Adaptado por Perez (2016) de Modenesi e Marques (2000).

2.2.3 Fases do Processo

O processo de soldagem por atrito é designado em fases, a *American Society of Metals* (2000) divide o processo em apenas duas etapas. Porém, para melhor entendimento, Pauly (1999) e Ellis (1972) mostram que a divisão em quatro etapas é melhor aplicável. A Figura 4 relaciona as condições de velocidade de

rotação torque, força axial e comportamento de queima com o tempo, onde demonstra a ação de cada parâmetro com cada fase do processo:

Figura 4 – Sistema esquemático das condições de operação durante as fases de processo de soldagem por atrito. I: Fase de atrito; II: Fase de aquecimento; III: Fase de frenagem; IV: Fase de adesão



Fonte: Adaptado de Meyer (2003)

As quatro fases envolvidas no processo de soldagem por atrito são: fase I de atrito (*Rubbing phase*), fase II de aquecimento (*Heating phase*), fase III de frenagem (*Breaking phase*) e fase IV de adesão (*Bonding phase*).

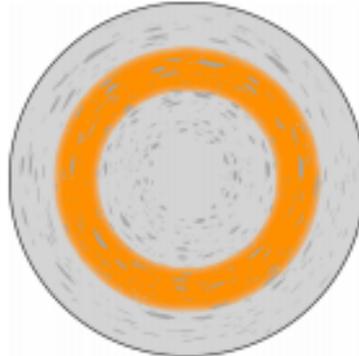
- Fase de atrito

Inicialmente ocorre o nivelamento superficial, o que resultará em um efeito de alisamento desta. Em seguida, ocorre brevemente a caracterização por processos de apreensão e micro adesão. Uma parte da superfície de soldagem entra em contato, com isso, o material atinge altos valores de pressão nestes locais, o que promove deformação plástica no local da interface, isso acaba iniciando o processo nas regiões externas de solda. Em pontos separados ocorrem micro ligações, estas são cisalhadas e acabam induzindo ao aquecimento do material, devido a energia que é liberada (PEREZ, 2016).

Após o processo de nivelamento da região externa completo, começa o desenvolvimento da liga rotacional do centro. Observa-se, na Figura 5, a

concentração de material na área anelar correspondente a distância do centro de metade até $2/3$ do raio de superfície de fricção. A área do anel cresce, aumenta a área de contato da soldagem e mais micro ligações surgem (MEYER, 2003).

Figura 5 – Peça na fase I do processo de soldagem por atrito

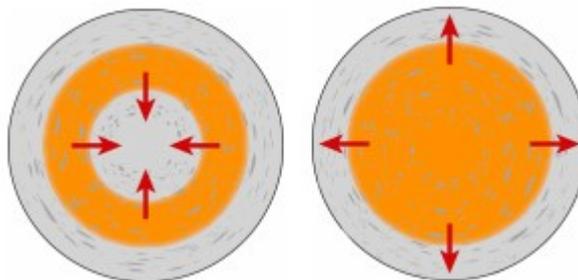


Fonte: Meyer (2003)

- Fase de aquecimento

O aumento da temperatura e da concentração de partículas fazem com que o material deformado plasticamente se mova para as zonas mais frias da superfície, conforme Figura 6. Este aumento da deformação do metal faz com que o torque diminua, fornecendo uma geração de calor menor, resultando numa temperatura também menor. Com o aumento da região plástica, a resistência da força axial reduz e o material é pressionado para fora da região de fricção, formando as chamadas rebarbas (zona de *flash*) (MEYER, 2003).

Figura 6 – Peça na fase II do processo de soldagem por atrito



Fonte: Meyer (2003)

A fase II é concluída quando o processo atinge os limites dos parâmetros de controle, ou seja, quando alcança o valor pré-determinado de temperatura, quantidade de material queimado (deformado plasticamente) ou tempo de operação (PEREZ, 2016).

- Fase de frenagem

A fase se inicia com a diminuição da velocidade de rotação, juntamente com isso ocorre o aumento do número de micro ligações. Desse modo, a temperatura oriunda da rotação é diminuída, porém, é mantida graças à energia do rompimento destas micro ligações (PINHEIRO, 2008).

Nota-se na Figura 4, um aumento do torque, isto se dá ao fato de que o cisalhamento eleva a resistência pois há menos deformação no processo. No momento crítico, a rotação chega num valor tão baixo que o rompimento das micro ligações não consegue manter mais a temperatura. Conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento do material aumenta e a deformação por torque acontece em uma região maior da peça de trabalho (MEYER, 2003).

- Fase de adesão

O método de adesão já se inicia na fase de aquecimento, mesmo com a união não sendo homogênea na superfície do material. A força axial se eleva, pois, a fase de forjamento se inicia, onde a adesão homogênea vai sendo alcançada durante toda a seção da fase (PEREZ, 2016).

O aumento da força axial resulta num aumento bruto do comprimento de queima, do torque e numa expulsão das camadas de óxidos nas regiões externas da zona de soldagem. A superfície soldada torna as partículas mais próximas, o que faz com que as regiões externas se juntem com uma distância atômica, produzindo uma adesão metálica de qualidade (MEYER, 2003).

Após a parada da rotação, o processo dinâmico de amolecimento do material é completo, mas o processo de difusão ainda continua. Com o esfriamento do material os processos de regeneração da rede cristalina e recristalização estática ocorrem, desse modo, as tensões internas são amplamente eliminadas, fator determinante para as propriedades mecânicas de uma solda por fricção (PINHEIRO, 2008).

2.3 PROCESSO DE DEPOSIÇÃO SUPERFICIAL POR ATRITO – FRICTION SURFACING (FS)

2.3.1 Breve Histórico

É um processo que foi mencionado primeiramente e patenteado em 1941 por Klopstock e Neelands. Nos anos seguintes, a antiga União Soviética foi desenvolvendo o processo influenciada pela corrida tecnológica ligada a Segunda Guerra Mundial, porém, com o fim da guerra, as pesquisas envolvendo o FS permaneceram estagnadas na década de 70. Na década de 80, foi reestabelecida a importância de processos não tradicionais de soldagem e deposição, seguindo o crescimento de interesse por processos com a metodologia de fricção a frio (PEREZ, 2016; GANDRA et al., 2013a).

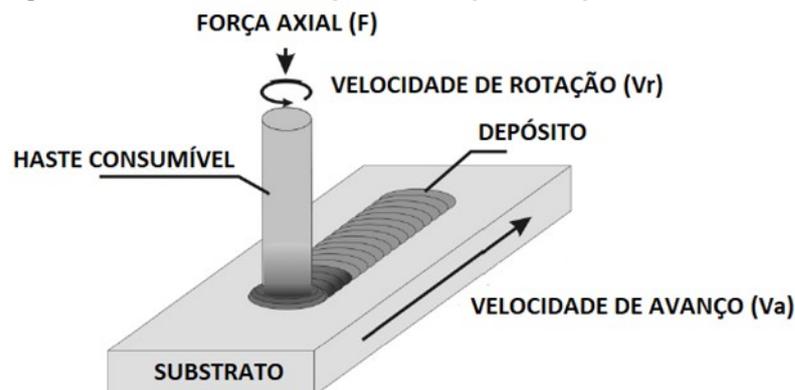
Nos últimos 15 anos, a tecnologia se desenvolveu, principalmente nas ligas de alumínio, onde pesquisas envolvendo a influência dos parâmetros de processo nos resultados obtidos surgiram. Sakihama, Tokisue e Katoh (2003) estudaram a aparência, espessura, comprimento e eficiência do depósito variando a força axial, velocidade de rotação e velocidade de avanço de um substrato e haste consumível da liga de alumínio AA5052. Vilaça, Gandra e Vidal (2012) e Suhuddin et al. (2012) analisaram a evolução micro estrutural oriunda do processo de recristalização que ocorre no FS em ligas de AA6082-T6 e AA2024-T3. Gandra et al. (2013b) estudou a deposição de uma liga de AA6082-T6 em um substrato de AA2024-T3. Recentemente, novas pesquisas envolvendo o reforço do consumível com partículas mais resistentes surgiram, Miranda et al. (2013) com partículas de carbeto de silício e alumina Karthik, Ram e Kottada (2016) com partículas de titânio pura.

2.3.2 Visão Geral

O *Friction Surfacing* (FS), também conhecido como processo de deposição superficial por atrito é uma técnica que ainda está em fase de pesquisa e desenvolvimento e que é estudada como uma alternativa para recobrimentos superficiais que sejam resistentes ao desgaste e/ou a corrosão (GALVIS et al., 2017).

O FS é um processo de deposição baseado na deformação plástica da haste consumível de metal e na consequente deposição sobre a superfície do componente (substrato), onde ocorre por atrito no estado sólido, de forma que não há fusão dos metais (substrato e haste consumível). Conforme Figura 7, inicialmente a haste consumível é submetida a um movimento de rotação com seguinte contato desta com o substrato, sob força de uma carga axial. Com isso o processo de atrito se inicia e gera calor entre a haste e o substrato, fazendo com que ocorra a deformação plástica do material consumível. As condições de pressão e temperatura conduzem a um processo de difusão resultante da deposição entre o material plástico e o substrato, de forma que surja uma interface entre estes materiais. Com a continuação da condução do calor, a interface plástica vai aumentando, formando assim uma camada espessa de deposição. Após a plastificação da haste e a consequente formação da interface, o substrato ou a haste é submetida a um movimento transversal, um avanço, fazendo com que ocorra o depósito de uma camada consumível no substrato (GALVIS et al., 2017; GANDRA et al., 2013a).

Figura 7 – Processo de deposição superficial por atrito

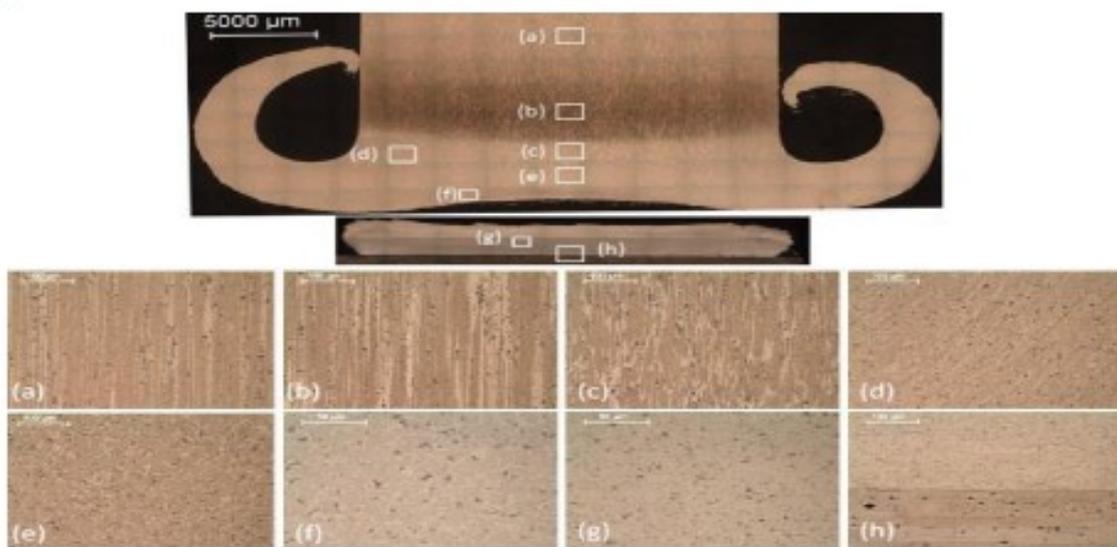


Fonte: Voutchkov et al. (2001)

A camada que foi depositada apresenta uma microestrutura refinada, oriunda do processo que ocorre após a deformação plástica, chamado de recristalização, representado na Figura 8e e 8f. Este processo proporciona uma ótima adesão dos componentes devido à difusão e adesão mecânica da força axial. O resultado final ainda é caracterizado por não ter defeitos comuns em processos de soldagem a quente, como poros e vazios (VOUTCHKOV et al., 2001; GANDRA et al., 2013a).

A Figura 8 demonstra a micrografia de uma seção transversal do processo. Inicialmente, temos a haste consumível (8a) que após se aproximar mais da interface entre haste e substrato temos a zona termicamente afetada (ZTA), representada em 8b. A ZTA apresenta microestrutura com grãos e precipitados mais espesso comparado com a zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA), representada em 8c, 8d e 8f. Em 8h podemos observar a interface unida entre a haste consumível e o substrato (OLIVEIRA, 2016).

Figura 8 – Microestrutura de uma liga AA6082-T6 sobre AA2024-T3.



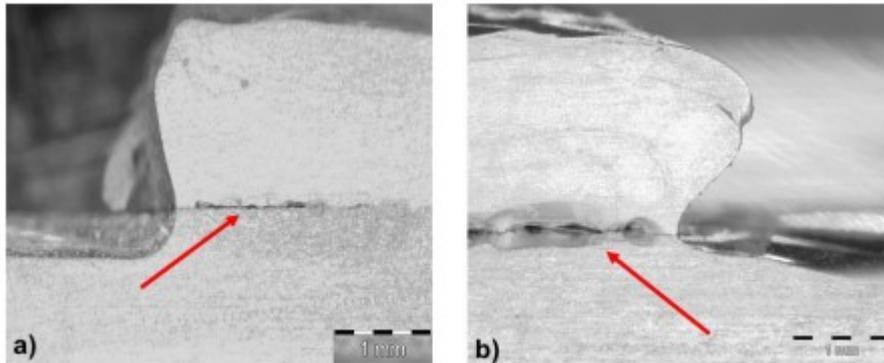
Fonte: Oliveira (2016)

O processo não apresenta apenas pontos positivos, com a formação da camada deformada plasticamente também se forma uma camada chamada de rebarba, um excedente que acaba sendo desperdiçado. Alocado no exterior da interface entre a haste e o substrato, na rebarba não ocorre adesão e contribui negativamente com a diminuição da eficiência da transferência de massa (SANTO, 2013).

Outro ponto não favorável no processo está associado com a presença de uma região que é formada nas extremidades da seção transversal, região chamada de solda fria, representado na Figura 9. Este fenômeno ocorre dos dois lados do processo, tanto do lado de avanço (lado onde o movimento da haste e o deslocamento do substrato apresentam a mesma direção) e do lado do recuo (lado onde o movimento da haste e o deslocamento do substrato apresentam direções opostas). Esta região representa menos do que 10% do tamanho da largura do

depósito. Isto ocorre devido ao gradiente de temperatura na interface do processo e distribuição heterogênea de pressão na superfície de contato da haste, fazendo com que a região mais distante da incidência do atrito apresente uma quantidade de calor menor, temperatura esta que não chega ao valor necessário para ocorrer à adesão (PEREZ, 2016).

Figura 9 – Macrografia da região de solda fria



Fonte: Oliveira (2016)

2.3.3 Vantagens e Desvantagens do Método

O processo de deposição por atrito apresenta vantagens que são importantes serem mencionadas, comparando com os métodos convencionais de revestimento, como os processos de revestimento com base na fusão dos materiais envolvidos, ou seja, os processos à quente.

- Não há riscos relacionados com emissão de poluentes gasosos;
- Não há riscos relacionados com eletricidade, não é utilizado altas tensões, diminuindo o risco para o trabalhador;
- Possibilidade de soldagem de materiais metálicos sem afinidade (ex. alumínio em aço carbono);
- Na maior parte das tentativas, a resistência e qualidade da deposição é igual ou superior à dos metais iniciais;

- Formação de um depósito homogêneo;
- Curto tempo de processamento;
- Não há desenvolvimento de defeitos do fenômeno de solidificação (parte do processo convencional de soldagem a quente): segregação, formação de poros e adsorção de hidrogênio, pois o processo ocorre a frio;
- Zona Termicamente Afetada (ZTA) é curta e estreita;
- Baixo custo total e baixo consumo energético, desse modo, o processo é atrativo financeiramente em relação a outros métodos existentes;
- Processo com capacidade de automação e reprodutibilidade, desse modo, se torna muito viável a aplicação industrial;
- Capacidade de deposição em diversos tipos de geometria de substrato.

Porém, o processo também apresenta desafios técnicos relacionados com a produtividade e com as características intrínsecas, abaixo estão listados os pontos que precisam de uma futura melhoria:

- Formação da solda fria, região que não adere ao substrato, fazendo com que o rendimento e produtividade do processo diminua;
- Concepção de uma camada de material deformado na ponta da haste, chamado de rebarba, este fenômeno diminui a eficiência da adesão;
- Necessidade de fixação da haste consumível e do substrato, carecendo de uma montagem adequada.

2.4 PARAMETROS DE PROCESSO DO FS

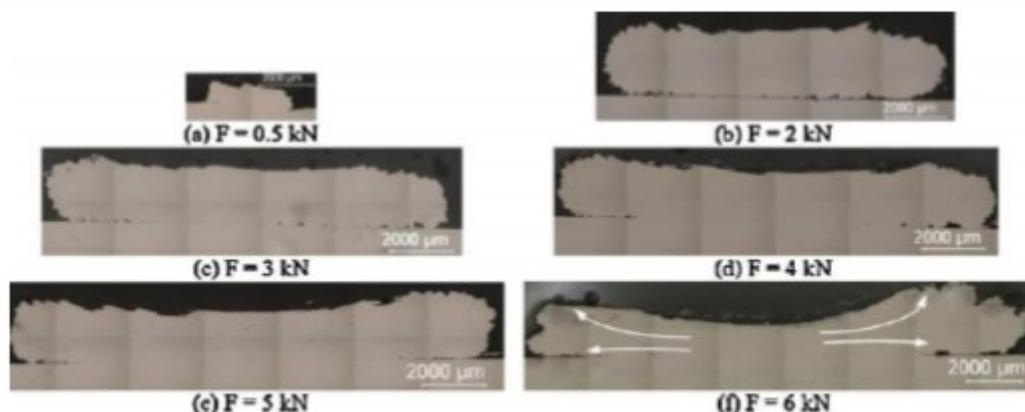
O processo de revestimento e de deposição são baseados em resultados relacionados com a espessura, largura e força da adesão, esses valores são dependentes dos parâmetros que o processo é submetido. Porém, esta dependência é complexa, de modo que podem ou não seguir um modelo linear de tendência, necessitando de um estudo aprofundado da influência de cada variável do processo. (VITANOV; VOUTCHKOV; BEDFORD, 2000).

De acordo com bibliografia, os parâmetros de processo principais para o processo de deposição superficial por atrito são: Força Axial (F), Velocidade de Rotação da haste consumível (V_R) e Velocidade de Avanço (V_A) (GANDRA, 2013a).

2.4.1 Força Axial (F)

Em concordância com estudos realizados por Vitanov, Voutchkov e Bedford (2000), o aumento da força axial resulta numa melhoria da resistência de adesão do depósito, ao mesmo tempo em que gera um depósito com uma espessura menor e uma largura maior. Forças muito elevadas influenciam na não uniformidade da deposição, fazendo com que surja uma depressão no meio do depósito. Este efeito foi demonstrado por Gandra, Miranda e Vilaça (2012) em uma deposição de aço macio em aço macio, conforme Figura 10.

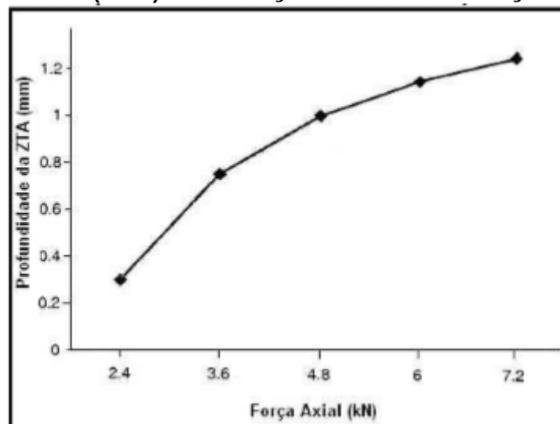
Figura 10 – Efeito da força axial na interface de deposição. FS de aço sobre aço. Haste consumível com diâmetro de 10mm, Velocidade de Rotação de 2500rpm e Velocidade de Avanço de 4,2mm/min



Fonte: Gandra; Miranda; Vilaça (2012)

Conforme estudos realizados por Gandra et al. (2013a), força axial insuficiente resulta numa consolidação ruim da interface, de modo que a resistência da adesão diminui. Também foi comprovado por Kalken (2001) que o aumento da força axial é proporcional ao aumento da profundidade da zona termicamente afetada do substrato, conforme Figura 11, este estudo foi realizado depositando por FS aço inoxidável em aço macio.

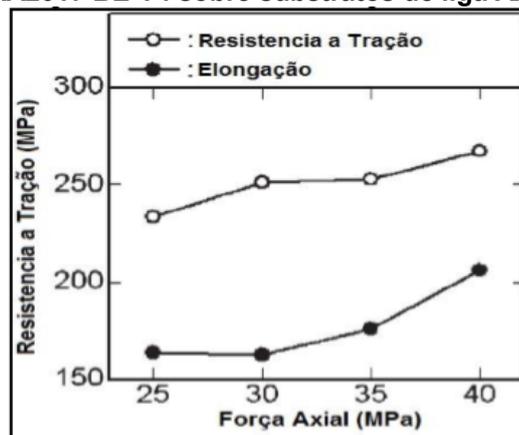
Figura 11 – Efeito da força axial na profundidade da zona termicamente afetada (ZTA). FS de aço inoxidável em aço macio



Fonte: Kalken (2001)

Alguns estudos também mostraram que a elevação da força axial implica num aumento de resistência mecânica dos depósitos, conforme Sakihama, Tokisue e Katoh (2003) e Tokisue et al. (2006). Na Figura 12 segue uma relação entre a resistência a tração com a força axial aplicada no processo de deposição da liga AA2017 BE-T4 sobre substratos de liga AA5052 P-34:

Figura 12 – Efeito da força axial na resistência a tração. FS da liga AA2017 BE-T4 sobre substratos de liga AA5052 P-34



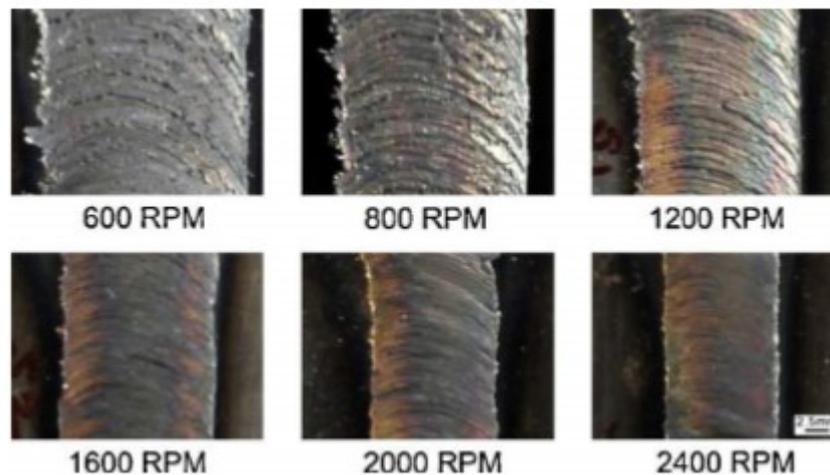
Fonte: Tokisue (2006)

2.4.2 Velocidade de Rotação (V_R)

As influências da velocidade de rotação nas características do processo incluem a qualidade da adesão, a rugosidade da deposição e a largura da camada depositada. Rotações baixas e intermediárias melhoram a qualidade da adesão na interface, enquanto rotações excessivas podem gerar uma redução da largura e da profundidade da zona termicamente afetada do substrato (GANDRA et al., 2013a; VITANOV; VOUTCHKOV; BEDFORD, 2000).

Foi comprovado por Rafi et al. (2010) que um aumento da velocidade de rotação proporciona um depósito mais plano e regular, gerando um forjamento mais efetivo da moldagem da deposição, conforme Figura 13, onde foi realizado o FS de um aço H13 em aço macio.

Figura 13 – Efeito da velocidade de rotação na largura e na rugosidade da superfície de deposição. FS de aço AISI H13 em aço macio. Haste com 18mm de diâmetro, força axial de 10kN e velocidade de avanço de 4mms

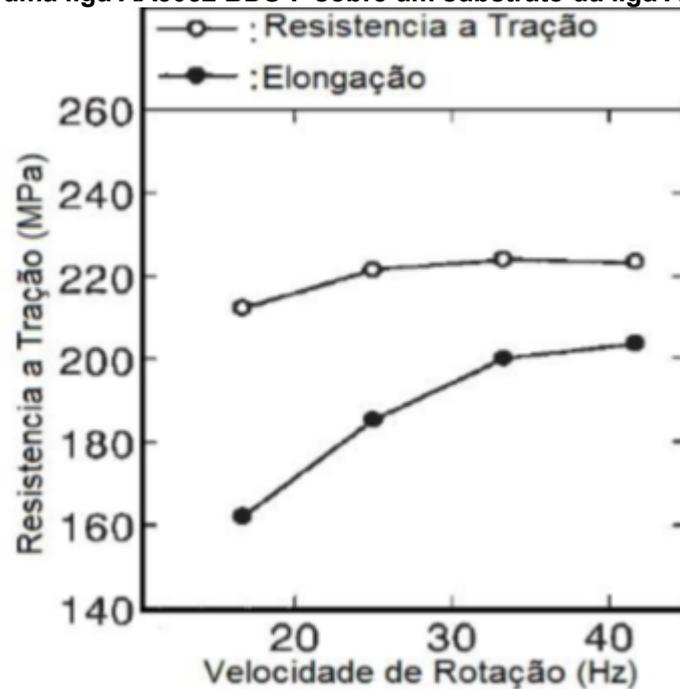


Fonte: Rafi et al. (2010)

Foi validado por Shinoda et al. (1998) que a velocidade de rotação da haste consumível influi diretamente no calor gerado entre as superfícies, o que faz com que a energia de adesão seja maior para maiores rotações, permitindo um controle de distribuição de calor.

De acordo com Sakihama, Tokisue e Katoh (2003), com o aumento da velocidade de rotação do processo de deposição superficial por atrito em alumínio os valores finais de espessura e largura do depósito diminuem. Além disso, também foi comprovado que a resistência a tração melhora com o aumento da velocidade de rotação. Isto é demonstrado abaixo na Figura 14:

Figura 14 – Efeito da Velocidade de Rotação na resistência a tração. FS de uma liga AA5052 BDS-F sobre um substrato da liga AA5052 P-H24



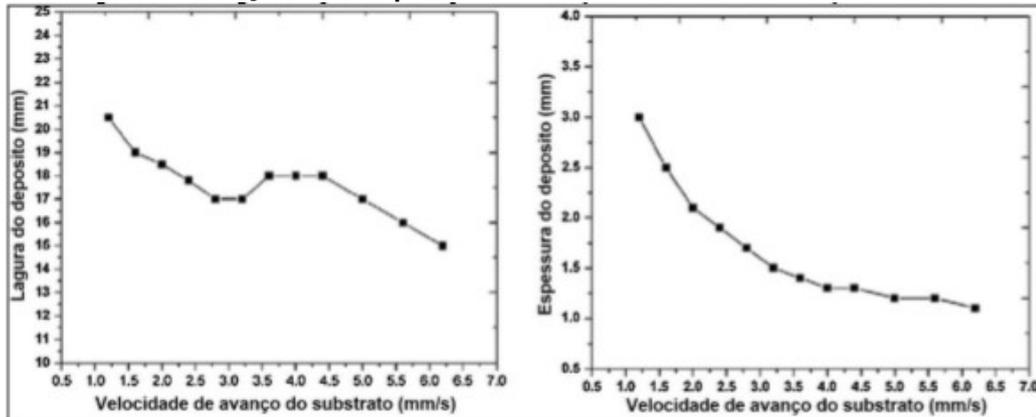
Fonte: Sakihama; Tokisue; Katoh (2003)

2.4.3 Velocidade de Avanço (V_A)

Estudos de Vitanov, Voutchkov e Bedford (2000), conduziram que o aumento da velocidade de avanço influencia na redução da espessura da deposição e do tempo de adesão existente entre a haste e o substrato, desse modo, os grãos recristalizados apresentam menos crescimento e a zona afetada pelo calor no substrato diminui.

A velocidade de avanço pode ser do substrato ou da haste consumível, isso difere do resultado, porém, com o aumento do avanço a largura da deposição também diminui, afinal, este parâmetro é responsável pela taxa de deposição do processo. Isto foi comprovado por Rafi et al. (2010), em um processo de FS de aço AISI 210 em aço macio, conforme Figura 15.

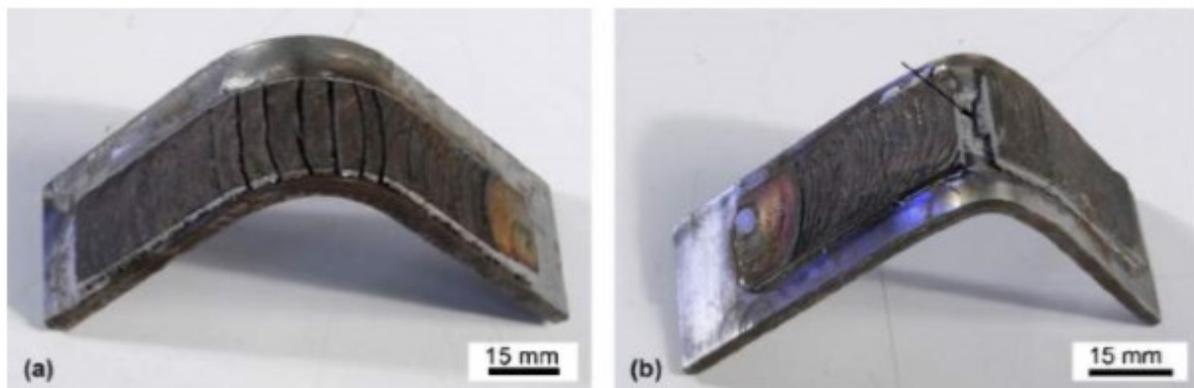
Figura 15 – Efeito da velocidade de avanço a largura e espessura do depósito. FS em aço inoxidável AISI 310 em aço macio. Haste com 18mm de diâmetro, força de 10kN e velocidade de rotação de 800rpm



Fonte: Rafi et al. (2010)

Rafi et al. (2010) também observou que deposições espessas são produzidas com velocidades de avanço menores, porém, apresentam falhas na interface quando expostas em baixas cargas de tração. Enquanto velocidades de avanço maiores tendem a ocorrer falhas no revestimento em cargas de tração maiores. Estas imperfeições estão demonstradas na Figura 16 abaixo:

Figura 16 – Falhas proveniente de um processo de deposição por atrito com velocidades de avanço não adequadas. (a) falha na deposição e (b) falha na interface



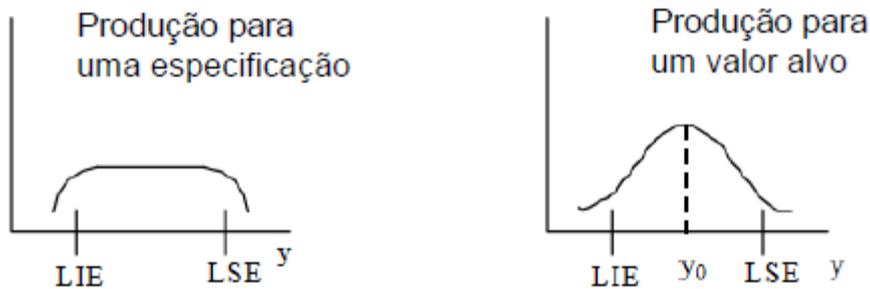
Fonte: Rafi et al. (2010)

2.5 MÉTODOS DE TAGUCHI

Genich Taguchi foi um cientista japonês que viveu entre 1924-2012 e que ficou conhecido pela sua contribuição para o desenvolvimento da área da estatística nos processos de qualidade. Tradicionalmente, os métodos são utilizados para obter uma produção dentro de uma especificação, porém, Taguchi desenvolveu um

procedimento distinto e inovador onde em vez de procurar uma função de um intervalo, passou-se a produzir valores alvo. Na Figura 17 esta diferença de conceitos é demonstrada através de gráficos, onde LIE significa limite inferior da especificação e LSE limite superior da especificação (MOURA, 2020).

Figura 17 – Método tradicional X Método Taguchi



Fonte: Moura (2020)

O Método de Taguchi possui o intuito de diminuir a variação do produto, identificando as condições que lhe conferem invariabilidade da qualidade perante as fontes de fatores não controláveis que estão presentes durante o processo de fabricação (PAREDES, 2012).

Para obter a melhor solução para uma produção de valor alvo, Taguchi estabelece a necessidade de uma função de perda, empregada para quantificar esta variabilidade do resultado final. Para isso, é dividida a característica da qualidade em três grupos:

- Nominal é melhor: existe um valor-objetivo, diferente de zero e infinito, para as características do produto acabado;
- Menor é melhor: o valor-objetivo é zero para as características do produto acabado;
- Maior é melhor: o valor-objetivo é infinito para as características do produto acabado.

A determinação dos valores dos parâmetros a serem estudados na análise é obtida de acordo com uma matriz ortogonal, conforme exemplo na Figura 18. Neste modelo temos 8 ensaios a serem realizados, 7 fatores a serem estudados (de A até G) dispostos nas colunas e 2 níveis para cada fator, ou seja, 2 valores diferentes para cada fator da coluna.

Figura 18 – Exemplo de Matriz Ortogonal

<i>Ensaio</i>	<i>Colunas</i>						
	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Fonte: Moura (2020)

Com a análise da tabela da matriz ortogonal é possível observar uma característica bem marcante, onde as colunas mais à esquerda são trocadas de níveis com menos frequência do que as colunas mais à direita, fato que faz com que os parâmetros mais difíceis de variar e com mais custos associados a essa troca sejam alocados nas primeiras colunas (PAREDES, 2012).

Depois de realizado os experimentos, a análise dos resultados do Método de Taguchi escolhida para o tratamento final dos dados foi a do método do gráfico de resposta, pois sua execução é simples e suficiente para a maioria das aplicações industriais (MOURA, 2020).

Com o mesmo exemplo da Figura 18, agora com os resultados obtidos em duplicada em R1 e R2, conforme Figura 19:

Figura 19 – Exemplo de Matriz Ortogonal com Resultados

Ensaio	Fatores/colunas							Resultados	
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>R</i> ₁	<i>R</i> ₂
	1	2	3	4	5	6	7		
1	1	1	1	1	1	1	1	11	11
2	1	1	1	2	2	2	2	4	4
3	1	2	2	1	1	2	2	4	10
4	1	2	2	2	2	1	1	4	8
5	2	1	2	1	2	1	2	9	4
6	2	1	2	2	1	2	1	4	3
7	2	2	1	1	2	2	1	1	4
8	2	2	1	2	1	1	2	10	8

Fonte: Moura (2020)

O próximo passo é a construção da tabela dos totais de reposta de cada nível para cada fator, conforme Figura 20, onde estes valores são obtidos pela soma dos valores de resposta correspondentes a cada um dos níveis de cada fator. Por exemplo, o total de respostas do nível 1 do fator A é a soma dos resultados dos ensaios 1, 2, 3 e 4 (ensaios que o fator A ocorre no nível 1):

$$A1 = (11+11) + (4+4) + (4+10) + (4+8) = 56$$

Figura 20 – Tabela dos Totais de Resposta de cada Nível para cada Fator

Fatores	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>
Nível 1	56	50	53	54	61	65	46
Nível 2	43	49	46	45	38	34	53

Fonte: Moura (2020)

Em seguida, a construção de uma tabela de valores médios e classificação da diferença entre níveis de cada fator são realizadas, conforme Figura 21, desse modo, é possível identificar quais fatores influenciam mais no resultado da análise. Para o cálculo dos valores médios, cada total de resposta é dividido pelo valor total de medições para cada nível, neste exemplo, este valor é 8.

Figura 21 – Tabela dos Valores Médios e Classificação da diferença entre Níveis de cada Fator

Fatores	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>
Nível 1	7.00	6.25	6.63	6.75	7.63	8.13	5.75
Nível 2	5.38	6.13	5.75	5.63	4.75	4.25	6.63
Diferença	1.62	0.12	0.88	1.12	2.88	3.88	0.88
Ordenação	3	7	5	4	2	1	6

Fonte: Moura (2020)

Por fim, é realizada a previsão da condição ótima de resposta de acordo com o objetivo do estudo, maximização ou minimização da resposta, neste exemplo será realizado a maximização da resposta, para seguir com o mesmo objetivo de estudo deste trabalho.

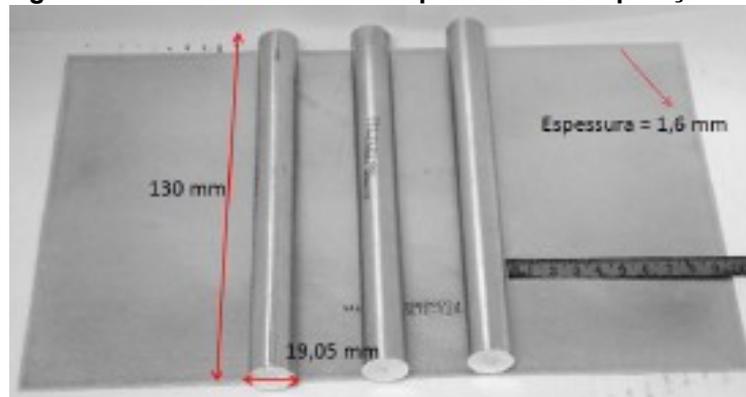
Assim, chegamos numa condição ótima selecionada pelos valores: $A_1B_1C_1D_1E_1F_1G_2$, sendo estes os melhores parâmetros para a maximização da resposta nestes níveis apresentados para cada fator.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Neste projeto, o substrato e a haste consumível são da liga de alumínio AA2024-T3. Ambos os materiais foram fornecidos pela Empresa Brasileira de Aeronáutica – EMBRAER S.A. Abaixo, na Figura 22, estão os materiais utilizados no processamento. Em relação as dimensões da haste consumível, seu diâmetro é de 19,05 milímetros e o comprimento é de 130 milímetros. Já o substrato possui espessura de 1,6 milímetros.

Figura 22 – Material utilizado no processo de deposição superficial por atrito



Fonte: Pereira (2016)

No Quadro 6, é observado a composição química em % (massa) da liga utilizada, onde a análise química foi realizada no Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) em Campinas-SP através da técnica de espectrometria de massa:

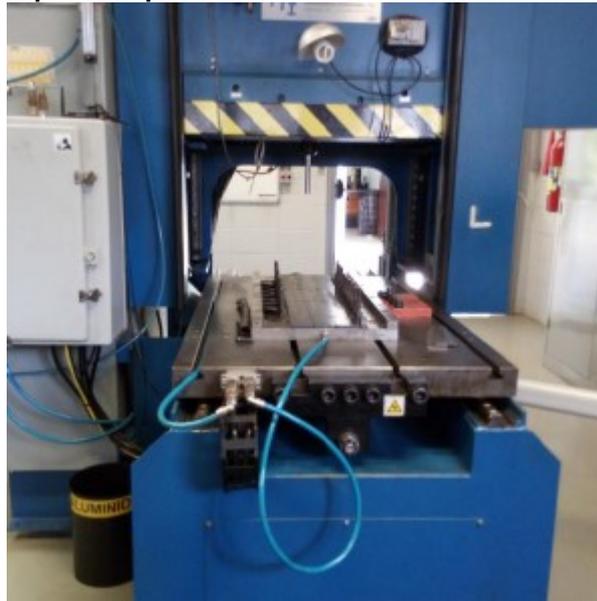
Quadro 6 – Composição química específica e analisada da liga de alumínio AA2024-T3

Liga/Elementos	Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Cr	Zn
AA2024-T3 especificada	94,7	4,9	1,8	0,9	0,5	0,5	0,1	0,1
AA2024-T3 analisada (haste)	93,2	4,25	1,44	0,70	0,25	0,05	0,001	0,033
AA2024-T3 analisada (substrato)	93,5	4,28	1,42	0,47	0,10	0,067	0,006	0,14

Fonte: Associação de Alumínio, de Padrões e Dados dos Alumínio 2000.

A máquina utilizada no processamento por atrito para a produção do depósito foi da Manufacturing Technology Inc. modelo RM1 instalada no laboratório Nacional de Nanotecnologia LNNANO no Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais CNPEM de Campinas, SP. O equipamento possui controle de deslocamento em dois eixos da mesa, X e Y, cabeçote com capacidade de rotação de 3000rpm e controle de carga aplicada com máxima capacidade de 80kN. A Figura 23 ilustra a máquina utilizada:

Figura 23 – Máquina utilizada no processamento de deposição superficial por atrito



Fonte: Pereira (2019)

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Processo de Deposição Superficial por Atrito

Os dados dos experimentos foram fornecidos pelo Convênio de Cooperação Científica e Tecnológica VDT055-12 – Projeto Friction Surfacing. As informações e os valores dos parâmetros de processo dos ensaios são divididos em duas partes.

Inicialmente, não se tinha nenhuma informação da literatura sobre os melhores parâmetros, então, os dados de força axial, velocidade de rotação e velocidade de avanço foram estabelecidos como consequência de tentativas que produzisse uma deformação na ponta da haste e uma deposição contínua ao longo do substrato.

Posteriormente, no segundo experimento, foi fornecida pelo convênio uma prévia de condições satisfatórias para o processo de deposição superficial por atrito de alumínios utilizados na indústria aeronáutica. Desse modo, foram realizados ensaios com valores baseados aos pré-estabelecidos de 14kN de força axial, 600mm/min de velocidade de avanço e 1500rpm de velocidade de rotação.

A matriz do primeiro experimento, representada no Quadro 7, determina a quantidade de ensaios realizados e o fator/nível de cada parâmetro de processo utilizado. Para a construção desta foram realizados 15 ensaios.

Em relação ao fator/nível dos parâmetros foram utilizadas as seguintes características: a força axial possui cinco fatores/níveis de observação, a velocidade de avanço possui quatro níveis de observação e a velocidade de rotação possui cinco níveis de observação. De acordo com a o Quadro 8, seguem os valores dos níveis de cada parâmetro.

Quadro 7 – Matriz do primeiro experimento

Nº do Ensaio	FA (kN)	VA (mm/min)	VR (rpm)
1	1	1	3
2	1	2	3
3	1	3	3
4	1	4	3
5	2	3	3
6	2	4	3
7	3	3	3
8	3	4	3
9	5	3	3
10	5	4	3
11	1	3	1
12	1	3	2
13	1	3	4
14	1	3	5
15	4	3	1

Fonte: Autoria própria.

Quadro 8 – Níveis dos parâmetros do primeiro experimento

Fatores	FA (kN)	VA (mm/min)	VR (rpm)
Nível 1	15	240	1000
Nível 2	17	360	1250
Nível 3	19	480	1500
Nível 4	20	600	1750
Nível 5	21	-	2000

Fonte: Autoria própria.

A matriz do segundo experimento, representada no Quadro 9, determina a quantidade de ensaios realizados e o fator/nível de cada parâmetro de processo utilizado. Para a construção desta foram realizados 21 ensaios.

Em relação ao fator/nível dos parâmetros foram utilizadas as seguintes características: a Força Axial (FA) possui cinco fatores/níveis de observação, a Velocidade de Avanço (VA) possui cinco níveis de observação e a Velocidade de Rotação (VR) possui quatro níveis de observação. De acordo com a o Quadro 10, seguem os níveis de cada parâmetro.

Quadro 9 – Matriz do segundo experimento

Nº do Ensaio	FA (kN)	VA (mm/min)	VR (rpm)
1	4	5	2
2	3	5	2
3	2	5	2
4	1	5	2
5	4	3	2
6	3	3	2
7	2	3	2
8	1	3	2
9	4	1	2
10	3	1	2
11	2	1	2
12	1	1	2
13	2	3	4
14	2	3	3
15	2	3	1
16	5	5	2
17	5	3	2
18	5	1	2
19	2	4	2
20	2	2	2
21	5	5	2

Fonte: Autoria própria.

Quadro 10 – Níveis dos parâmetros do segundo experimento

Fatores	FA (kN)	VA (mm/min)	VR (rpm)
Nível 1	13	400	1400
Nível 2	13,5	450	1500
Nível 3	13,7	500	1600
Nível 4	14	550	1750
Nível 5	14,5	600	-

Fonte: Autoria própria.

Os resultados foram obtidos calculando a largura e a espessura da deposição de cada um dos ensaios dos experimentos. Em relação a largura, foram descontados da seção transversal da deposição a região de solda fria, que não ocorre adesão devido a distribuição da temperatura da interface. Já a espessura foi medida calculando o valor do depósito junto com a espessura da interface, portanto, a espessura do substrato foi calculada junto.

O cálculo da largura efetiva e da espessura efetiva foi realizado por uma medição manual dos valores dos depósitos a partir da macrografia em seção transversal obtida pelo Convênio de Cooperação Científica e Tecnológica VDT055-12 – Projeto Friction Surfacing. Com o auxílio de uma régua foram medidas duas vezes os valores e obtido uma média destes.

3.2.2 Análise dos Parâmetros de Processo pelo Método de Taguchi

Para a análise dos melhores parâmetros de processo (Força Axial, Velocidade de Rotação e Velocidade de Avanço) será utilizado o Método de Taguchi, pois ele permite a identificação dos meios para conferir ao processo a robustez desejada, ou seja, assimila os melhores parâmetros de processo com a produção de uma deposição com alta performance e resultados mais satisfatórios dentro de um valor alvo para a maximização da resposta.

O primeiro passo é a identificação da solução, onde se toma conhecimento do processo e quais fatores de produção influenciam os valores exibidos após o processamento. Se a relação entre esses níveis de processo e resultados fossem lineares, facilmente seria realizada a identificação. Porém, com a complexidade da deposição e com a influência das outras variáveis se torna mais difícil a identificação das perturbações que ocorrem (TAGUCHI, 1986).

Assim, o método de Taguchi indica uma combinação de experimentos estatisticamente planejados (formulação de um desenho estatístico de experimentos – DOE), de modo que os parâmetros de processo interfiram em níveis diferentes, ou seja, com valores de grandeza diferentes (MONTGOMERY, 1991).

Posteriormente, ocorre a predição dos níveis ótimos dos parâmetros, desse modo, é obtido uma relação entre os dados coletados e os resultados encontrados. Com isso, é identificado as variáveis que mais afetam a variabilidade e os resultados finais, projetando os melhores parâmetros (TAGUCHI, 1986; CASTRO, 1999).

Para o tratamento dos dados obtidos com o Método de Taguchi foi utilizado um software chamado *Minitab*, com o intuito de facilitar e automatizar a geração de gráficos e de dados de respostas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a obtenção dos melhores parâmetros de processo foram realizados dois experimentos similares com diferentes valores de força, velocidade de rotação e velocidade de avanço. Com os resultados foi realizado o tratamento destes dados com a aplicação do método de Taguchi com o intuito de obter uma deposição homogênea, com bons resultados de espessura, largura e qualidade da interface.

4.1 ANÁLISE DE TAGUCHI DO PRIMEIRO EXPERIMENTO APLICADO NA OBTENÇÃO DOS MELHORES PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO

Com a realização do experimento foi obtido o valor da largura efetiva e da espessura efetiva, com estes dois resultados foi feito uma análise referente à eficiência do processo. Seguem no Quadro 11 os resultados de cada experimento:

Quadro 11 – Resultados do primeiro experimento

Nº do Ensaio	Largura efetiva (mm)	Espessura efetiva (mm)
1	14,56	2,85
2	14,22	2,88
3	14,05	2,79
4	14,92	2,75
5	14,03	2,76
6	13,15	2,69
7	14,10	2,83
8	13,89	2,73
9	14,65	2,84
10	14,30	2,70
11	14,75	3,04
12	14,45	2,95
13	12,38	2,60
14	21,10	2,20
15	16,85	3,10

Fonte: Autoria própria.

Com os resultados obtidos, foi chegado ao cálculo de um desvio padrão de 0,66 para a largura efetiva e de 0,13 para a espessura efetiva, o que demonstra que os dados de resultado da espessura apresentaram menos dispersão dos dados em

torno da média, portanto, indica que os resultados de largura variam mais de acordo com os parâmetros estabelecidos.

4.1.1 Efeito dos fatores/níveis para o primeiro experimento

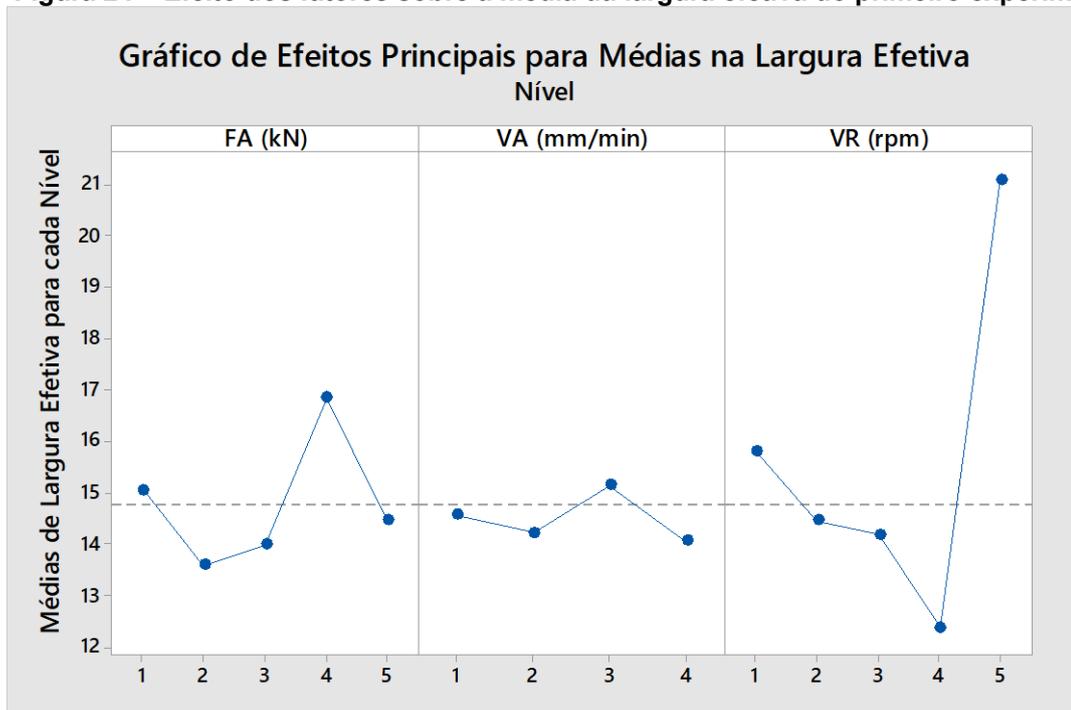
Os parâmetros que mostraram um maior valor em relação à largura efetiva foram: parâmetro FA, nível 4 com uma força axial de 20 kN; parâmetro VA, nível 3 com uma velocidade de avanço de 480 mm/min; parâmetro VR, nível 5 com uma velocidade de rotação de 2000 rpm; veja Quadro 12 e Figura 24.

Quadro 12 – Dados resposta da largura efetiva pela média do primeiro experimento

Nível	FA (kN)	VA (mm/min)	VR (rpm)
1	15,05	14,56	15,80
2	13,59	14,22	14,45
3	14,00	15,15	14,19
4	16,85	14,07	12,38
5	14,48	-	21,10
Delta	3,26	1,09	8,72
Posto	2	3	1

Fonte: Autoria própria.

Figura 24 – Efeito dos fatores sobre a média da largura efetiva do primeiro experimento



Fonte: Autoria própria

Além disso, de acordo com a Figura 24, é possível observar um aumento na velocidade de rotação no nível 5, como a interação entre os parâmetros é complexa e a amostragem no nível 5 foi pequena em relação por exemplo, ao nível 3, não é possível afirmar com certeza que este valor apresenta um resultado fidedigno da realidade, podemos estar diante de um ponto fora da curva.

Conclui-se também que a ordem dos fatores que mais afetam a média da largura efetiva do segundo experimento, pelo Quadro 12, é a velocidade de rotação, seguido pela força axial e por último, a velocidade de avanço.

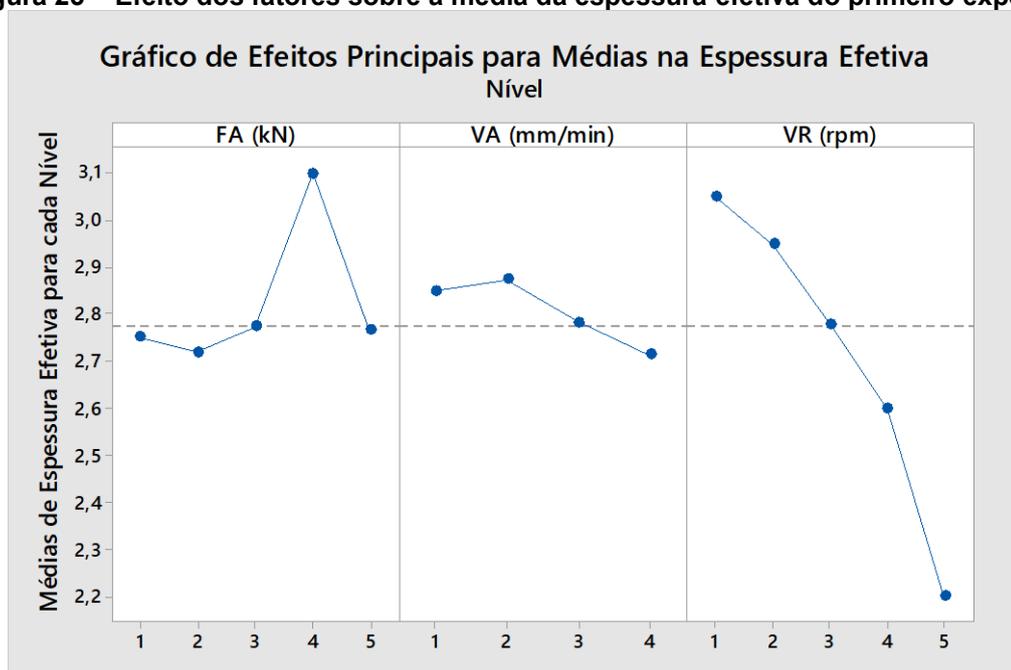
Os parâmetros que mostraram um maior valor em relação à espessura efetiva foram: parâmetro FA, nível 4 com uma força axial de 20 kN; parâmetro VA, nível 2 com uma velocidade de avanço de 360 mm/min; parâmetro VR, nível 1 com uma velocidade de rotação de 1000 rpm; veja Quadro 13 e Figura 25.

Quadro 13 – Dados resposta da espessura efetiva pela média do primeiro experimento

Nível	FA (kN)	VA (mm/min)	VR (rpm)
1	2,75	2,85	3,05
2	2,72	2,88	2,95
3	2,78	2,78	2,78
4	3,10	2,72	2,60
5	2,77	-	2,20
Delta	0,38	0,16	0,85
Posto	2	3	1

Fonte: Autoria própria.

Figura 25 – Efeito dos fatores sobre a média da espessura efetiva do primeiro experimento



Fonte: Autoria própria

Também é possível se concluir que a ordem dos fatores que mais afetam a média do segundo experimento tanto para a largura quanto para a espessura é igual aos dados da largura efetiva, pelas Quadros 12 e 13, sendo a Velocidade de Rotação, seguida pela Força Axial e por último, a Velocidade de Avanço.

Comparando os gráficos de largura e espessura efetiva, observamos que a força axial e a velocidade de avanço seguiram o mesmo padrão de variação, porém, a velocidade de rotação apresentou um comportamento inversamente proporcional, onde um aumento implica na diminuição da espessura efetiva e um aumento da largura efetiva.

Com isso, chega-se a uma condição ótima para o primeiro experimento dada por:

- Força Axial: nível 4 - 20kN;
- Velocidade de Avanço: nível 2 - 360mm/min;
- Velocidade de Rotação: nível 1 - 1500rpm.

Como nesse primeiro experimento não tínhamos mais informações sobre o comportamento dos parâmetros de processo na deposição superficial por atrito, chegamos a uma condição ótima que maximiza os resultados de largura e espessura dos ensaios realizados.

4.2 ANÁLISE DE TAGUCHI DO SEGUNDO EXPERIMENTO APLICADO NA OBTENÇÃO DOS MELHORES PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO

.Analogamente, com a realização do experimento obtemos o valor da largura efetiva e da espessura efetiva, com estes dois resultados foram realizadas análises referentes à eficiência do processo. Seguem no Quadro 14, os resultados de cada ensaio:

Quadro 14 – Resultados do segundo experimento

Nº do Ensaio	Largura efetiva (mm)	Espessura efetiva (mm)
1	14,00	2,48
2	13,20	2,41
3	13,00	2,26
4	13,40	2,21
5	13,60	2,67
6	13,00	2,52
7	13,40	2,42
8	13,60	2,67
9	13,16	2,55
10	14,70	2,60
11	14,30	2,21
12	14,60	2,78
13	13,30	2,40
14	13,00	2,43
15	13,50	2,33
16	14,00	2,38
17	13,20	2,68
18	14,60	2,63
19	13,50	2,40
20	13,70	2,64
21	12,20	2,24

Fonte: Autoria própria.

Com os resultados obtidos, foi chegado ao cálculo de um desvio padrão de 1,93 para a largura efetiva e de 0,20 para a espessura efetiva. Desse modo, esta análise segue o mesmo padrão do primeiro experimento, onde a largura efetiva indica ser mais representativa na hora da variação dos dados em relação à média dos resultados. Porém, comparando todos os quatro valores de desvio padrão obtidos, o valor de largura efetiva para o segundo experimento demonstrou ser o mais que o dobro do valor da largura efetiva para o primeiro experimento.

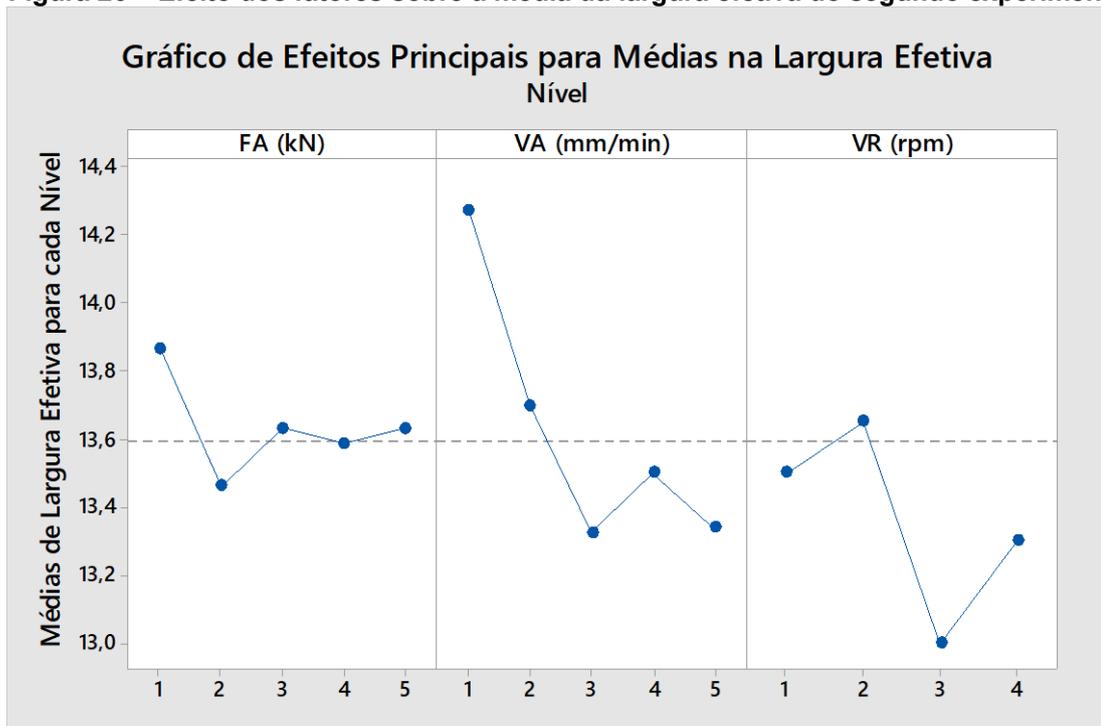
4.2.1 Efeito dos fatores/níveis para o segundo experimento

Com o auxílio de um software chamado *Minitab* foi realizado o processamento dos dados experimentais obtidos. Os parâmetros que mostraram um maior valor em relação à largura efetiva foram: parâmetro FA, nível 1 com uma força axial de 13 kN; parâmetro VA, nível 1 com uma velocidade de avanço de 400 min; parâmetro VR, nível 2 com velocidade de rotação de 1500 rpm; veja Quadro 15 e Figura 26.

Quadro 15 – Dados resposta da largura efetiva pela média do segundo experimento

Nível	FA (kN)	VA (mm/min)	VR (rpm)
1	13,87	14,27	13,50
2	13,46	13,70	13,65
3	13,63	13,33	13,00
4	13,59	13,50	13,30
5	13,63	13,34	-
Delta	0,40	0,95	0,65
Posto	3	1	2

Fonte: Autoria própria.

Figura 26 – Efeito dos fatores sobre a média da largura efetiva do segundo experimento

Fonte: Autoria própria

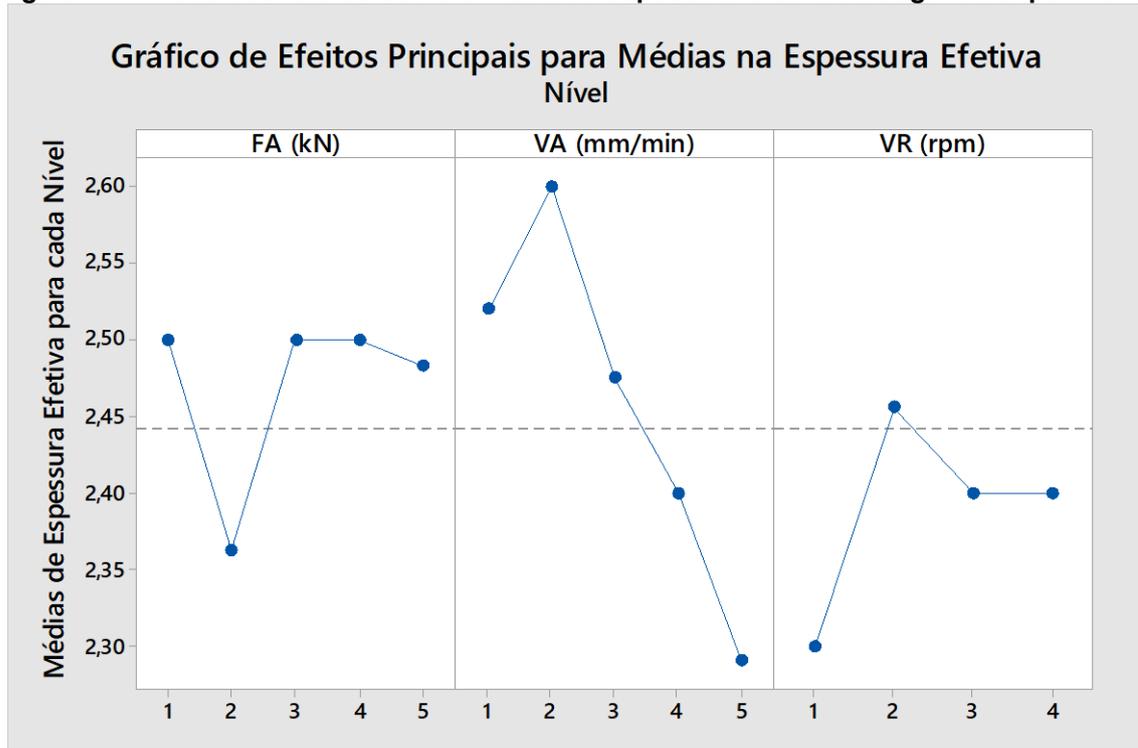
Conclui-se também que a ordem dos fatores que mais afetam a média da largura efetiva do primeiro experimento, pelo Quadro 15, é a velocidade de avanço, seguido pela velocidade de rotação e por último, a força axial.

Os parâmetros que mostraram um maior valor em relação à espessura efetiva foram: parâmetro FA, nível 1, 3 e 4 apresentaram a mesma média de espessura com uma força axial de 13, 13,7 e 14 kN respectivamente; parâmetro VA, nível 2 com uma velocidade de avanço de 450 mm/min; parâmetro VR, nível 2 com uma velocidade de rotação de 1500 rpm; veja Quadro 16 e Figura 27.

Quadro 16 – Dados resposta da espessura efetiva pela média do segundo experimento

Nível	FA (kN)	VA (mm/min)	VR (rpm)
1	2,50	2,52	2,30
2	2,36	2,60	2,46
3	2,50	2,48	2,40
4	2,50	2,40	2,40
5	2,48	2,29	-
Delta	0,14	0,31	0,16
Posto	3	1	2

Fonte: Autoria própria.

Figura 27 – Efeito dos fatores sobre a média da espessura efetiva do segundo experimento

Fonte: Autoria própria

Também é possível se concluir que a ordem dos fatores que mais afetam a média do primeiro experimento tanto dos dados da largura quanto dos dados da espessura, pelos Quadros 15 e 16, sendo a Velocidade de Avanço, seguida pela Velocidade de Rotação e por último, a Força Axial. A variação obtida na força axial e na velocidade de rotação é aproximadamente a metade da variação da velocidade de avanço, com isso, observamos que à medida que afunilamos mais os níveis dos ensaios e diminuimos o range do intervalo dos valores a velocidade de avanço se torna um parâmetro que influencia mais os resultados.

Comparando os gráficos de largura e espessura efetiva, observamos que a força axial e a velocidade de rotação apresentam o mesmo padrão de

comportamento. Porém, a velocidade de avanço temos uma divergência no nível 2, onde a melhor espessura efetiva indica uma piora significativa na largura efetiva, sendo necessário um valor intermediário para não comprometer nenhum dos resultados analisados.

Com isso, chega-se a uma condição ótima do segundo experimento dada por:

- Força Axial: nível 1 - 13kN;
- Velocidade de Avanço: nível 1 - 400mm/min;
- Velocidade de Rotação: nível 2 - 1500rpm.

A condição ótima obtida do segundo experimento são ensaios mais aprofundados, já que a partir da elaboração da matriz de ensaios já se tinham informações e indícios sobre os melhores parâmetros de processo. Com isso, é possível comparar os resultados com outros autores, porém, o processo de deposição superficial por atrito ainda é muito recente, não se encontra muita informação disponível sobre a aplicação em liga de alumínio AA2024-T3.

Numa deposição superficial por atrito em liga de alumínio AA6351-T6 sobre substrato de liga de alumínio AA5052-H32, Perez (2016) utiliza os seguintes parâmetros de processo: velocidade de avanço de 240mm/min, 300 mm/min e 340 mm/min, velocidade de rotação de 3000rpm e força axial não obtida diretamente por razão da máquina ser convencional.

Para estabelecer as propriedades mecânicas de uma liga de alumínio AA5052 P-H34, Tokisue (2006), estabelece um intervalo de valores similares para o estudo: velocidade de avanço de 300 até 660 mm/min, velocidade de rotação de 800 até 1400rpm e força axial de 10 até 16kN.

Portanto, de acordo com a condição ótima do segundo experimento, chega-se em valores similares e próximos aos parâmetros utilizados na literatura. Considerando que cada liga de alumínio tem suas características singulares, temos conseqüentemente que cada liga terá valores de processo diferentes das outras, o que já é esperado para o processo de deposição superficial por atrito.

5 CONCLUSÃO

Com a finalização deste trabalho foi possível definir os melhores parâmetros de processo para o método de deposição por atrito num substrato e haste consumível de alumínio AA2024-T3, de modo, que a tecnologia possa ser utilizada nos processos de fabricação e reparo de alguns componentes estruturais de aeronaves em superfícies resistentes à corrosão, ao desgaste e a formação de trincas por fadiga.

A condição ótima obtida do segundo experimento são ensaios mais desenvolvidos, já que a partir da elaboração da matriz de ensaios já se tinham informações sobre os valores das variáveis de processo. Sendo assim, os melhores parâmetros de processo da deposição superficial por atrito é de: Força Axial de 13kN; Velocidade de Avanço de 360mm/min e Velocidade de Rotação de 1500rpm.

Como resultados diversos comportamentos foram observados: foi constatado que uma força axial elevada implica numa diminuição da espessura da deposição, também foi verificado que uma velocidade de avanço alta implica na diminuição da largura e da espessura do depósito. Em relação à velocidade de rotação, foi observado que seu aumento implica num aumento de largura, porém numa diminuição de espessura, então é necessário um valor intermediário para não comprometer a deposição.

Como dito anteriormente, o processo de deposição por atrito é um procedimento muito complexo e que depende de várias variáveis para a obtenção da melhor deposição, onde além dos parâmetros de processo os materiais utilizados no consumível e no substrato também são de grande influência para a qualidade da deposição. Porém, mesmo sendo um processo de muitas variáveis, a sua aplicação final é muito vantajosa, pois prolonga a utilização de chapas de alumínio, o que implica numa diminuição de custos e aumento da vida útil do produto.

Portanto, nestas condições de haste e de substrato os melhores parâmetros foram encontrados. Para a utilização deste processo em outros materiais é necessário este estudo para a caracterização e modelagem do comportamento dos parâmetros no processo específico.

REFERÊNCIAS

- ABREU, C. P. de. **Caracterização da reatividade das ligas alumínio AA2024-T3 e AA7475-T651 soldadas por fricção (FSW)**. 2016. Programa de Doutorado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear de Materiais – Instituto de Pesquisas Energética e Nucleares: Autarquia associada à Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.
- ALUMINUM ASSOCIATION - **Alloy and Temper Designation System for Aluminum – AA H35.1** – Aluminum Association, E.U.A., 2000.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS INTERNACIONAL. **ASTM E340-13: Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys**. ASTM International, 2002.
- AMERICAN SOCIETY OF METALS INTERNACIONAL. **ASM Handbook Committee: Metallography and Microstructure**. ASM International, 2004.
- AMERICAN SOCIETY OF METALS INTERNACIONAL. **ASM Metals Handbook: Mechanical Testing and Evaluation**. v.8. 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (ABAL). **Alumínio e saúde**. São Paulo, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (ABAL). **Soldagem**. São Paulo, 2017.
- BALANÇO MINERAL BRASILEIRO. **Alumínio**. Brasil, 2001.
- BEVINGTON, J. H. **Spinning tube**. US Patent N°. 444721^a. 1981.
- BUGARIN, A. de F. S. **Estudo da resistência à corrosão das ligas de alumínio 2024-T3 e 7475-T651 soldadas por fricção e mistura (FSW)**. 2017. Programa de Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear e Materiais - Instituto de Pesquisas Energética e Nucleares: Autarquia associada à Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017.
- CASELATTO, A. L. **Caracterização microestrutural de ligas de alumínio dissimilares soldadas por fricção e mistura (FSW)**. 2016. Programa de Graduação em Engenharia de Materiais e Manufatura – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2016.
- CASTRO, P. M. **Método de Taguchi: Apresentação e caso prático com utilização do SAS**. Programa de Mestrado em Estatística e Gestão de Informação - Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação: Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 1999.
- CONVÊNIO DE COOPERAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA VDT055-12. **Projeto Friction Surfacing**. Brasil, 2016.
- CROSSLAND, B. Friction Welding - Recommended practices for friction welding. IN: **Contemporary Physics**, v. 12, n.6, p. 559-574, 1971.
- ELLIS, C. R. G, Continuous Drive Friction Welding of Mild Steel. IN: **Welding Journal**, p. 183-197, abr. 1972.
- FIORAVANTI, A. S. **Soldagem por FSW de ligas de alumínio ALCLAD AA2025-T3 e AA7075-T6**. 2008. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.
- FREITAS, P. S. de. **Tratamento térmico dos metais: da teoria à prática**. SENAI-SP Editora, São Paulo, 2014.
- GALVIS, J. C. et al. Influence of friction surfacing process parameters to deposit AA6351-T6 over AA5052-H32 using conventional milling machine. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 245, p. 91-105, 2017.

GALVIS, J. C.; OLIVEIRA, P. H. F.; HUPALO, M. F.; MARTINS, J. P., CARVALHO, A. L. M. Influence of friction surfacing process parameters to deposit AA6351-T6 over AA5052-H32 using conventional milling machine. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 245, p. 91-105, fev. 2017.

GANDRA, J.; KROHN, H.; MIRANDA, R. M.; VILAÇA, P.; QUINTINO, L.; DOS SANTOS, J. F. Friction surfacing – a review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 214, p. 1062-1093, dez. 2013a.

GANDRA, J.; MIRANDA, R. M.; VILAÇA, P. Performance analysis of friction surfacing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 8, p. 1676-1686. 2012.

GANDRA, J.; PEREIRA, D.; MIRANDA, R.M.; SILVA, R.J.C.; VILAÇA, P. Deposition of AA602-T6 over AA2024-T3 by friction surfacing – mechanical and wear characterization. *Surface and Coating Technology*, v. 223, p. 32-40, 2013b.

GGD METALS. **Alumínio**. São Paulo, 2015.

GIRISHA, H. N., SHARMA, K. V. Effect of magnesium on strength and microstructure of aluminum, copper, magnesium alloys. **Internacional Journal of Scientific Engineering and Research**, v. 3, fev. 2012.

HATCH, J. E. **Aluminum: Properties and Physycal Metallurgy**. American Society for Materials, p. 424, 1983.

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA (IFSC). **Melhorando as propriedades do alumínio**. Santa Catarina, 2009.

KALKEN, A. M. **Friction Surfacing of Stainless Steel on Mild Steel With a Robot**. Programa de Mestrado em Engenharia de Materiais - Delft University of Technology. Holanda, 2001.

KARTHIK, G.M., RAM, G.D.J., KOTTADA, R.S. Friction deposition of titanium particle reinforced aluminum matrix composites. **Materials Science Engineering**, v. 653, p. 71-83, jan. 2016.

KLOPSTOCK, H.; NEELANDS, A.R. **An improved method of joining or welding metals**, UK Patent Nº. GB572789. 1941.

LIU, J.; KULAK, M. **A New Paradigm in the Design of Aluminum Alloys for Aerospace Application**. Materials Science Forum, Suíça, v.331, 2000.

MAGALHÃES, D. C. C. **Microestrutura e Propriedades Mecânicas da liga AA6061 processada por Deformação Plástica severa em Temperatura Criogênica**. 2017. 173 f. Dissertação (Pós-Graduação) – Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

MASCAGANI, Daniela Branco Tavares. **Estudo das propriedades de barreira de filmes depositados a plasma sobre a liga de alumínio 2024**. 2009. 140 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Ciências e Tecnologia de Materiais, Universidade Estadual Paulista —Júlio de Mesquita Filho, Sorocaba, 2009.

MATRUKANITZ, R.P. **Selection and weldability of heat-treatable aluminum alloys**. American Society for Metals Handbook - Welding, Brazing and Soldering, p. 528-536, 1990.

MENDES, P. **Breve histórico da tabela periódica**. 2000. Disponível em: http://www.videos.uevora.pt/quimica_para_todos/qpt_breve%20historia_periodica.pdf. Acesso em: 10 nov. 2018.

MEYER, A. **Friction Hydro Pillar Processing Bonding Mechanism and Properties**. 2003. Programa de Doutorado da *Technischen Universität Braunschweig*. Alemanha, 2003.

- MIRANDA, R.M.; SANTOS, T.G.; GANDRA, J.; LOPES, N., SILVA, R.J.C. Reinforcement strategies for producing functionally graded materials by friction stir processing in aluminium alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 213, p. 1609-1613, set. 2013.
- MODENESI, P.J.; MARQUES, P. V. **Soldagem I, Introdução aos Processos de Soldagem**. 2000. Disponível em: <http://www.asmtreinamentos.com.br/downloads/soldador/arquivo84.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2018.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of experimente**. 3. Ed. USA: John Wiley & Sons Inc. 1991.
- MOURA, C. **Métodos de Taguchi em Química Analítica**, 2020. 54 slides. Disponível em: https://moodle2021.up.pt/pluginfile.php/221080/mod_resource/content/1/Aulas_9_MTQA_11Mai2021.pdf. Acesso em: 09 out. 2021.
- NAFSIN, N. et al. **Efeitos do Cobre e Magnésio na Microestrutura e Dureza de ligas de Al-Cu-Mg**. 2013. Universidade de Engenharia e Tecnologia de Bangladesh, Bangladesh, 2013.
- NASCIMENTO, F. M. F. **Processamento por Fricção Linear: Caracterização e análise de ligas de alumínio processadas AA5083-O e AA7022-T6**. 2007. Programa de Mestrado em Engenharia de Materiais – Universidade Técnica de Lisboa. Portugal, 2005.
- NICHOLAS, E. D. Friction surfacing. **ASM Handbook – Welding Brazing and Soldering**, ASM Internacional, Ohio, United States of America, p. 321-323, 1993.
- OLIVEIRA, J. C. P. T. **Evolução da microestrutura e da textura durante a laminação a frio e a recristalização de alumínio com diferentes níveis de pureza**. 2009. Programa de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.
- PHADKE, S. M., 1989. **Quality Engineering Using Robust Design**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J
- PAREDES, R. S. C. **Metodologia e Planejamento Experimental**. 2012. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME714/Planejamento%20experimento%20Taguchi.pdf>. Acesso em: 09 out. 2021.
- PAULY, D. **Process development on an experimental Friction Hydro Pillar Processing system**. GKSS *Forschungszentrum*, Internal Report, 1999.
- PEREIRA, F. M. **Caracterização Microestrutural da AA2024-T3 revestida com AA2024-T3 por Friction Surfacing**. 2019. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2019.
- PEREZ, J. C. G. **Avaliação do Processo de Deposição Superficial por Atrito em liga de Alumínio AA6351-T6 sobre substrato de liga de Alumínio AA5052-H32**. 2016. Disponível em: <http://tede2.uepg.br/jspui/bitstream/prefix/1474/1/JUAN%20CARLOS%20GALVIS.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2018.
- PHILIPSON, F. R.; OLIVEIRA, G. G. Tratamento térmico de alumínio. IN: II Seminário técnico de tratamento térmico do Alumínio e suas ligas. **ANAIS do II Seminário técnico de tratamento térmico do Alumínio e suas ligas**. Osasco: ABAL/SENAI, 2002.
- PINHEIRO, G. A. **Local Reinforcement of Magnesium Components by Friction Processing: Determination of Bonding Mechanisms and Assessment of Joint Properties**. 2008. Programa de Doutorado da Universität Hamburg-Harburg. Alemanha, 2008.
- RAFI, H. K.; RAM, G. D. J.; PHANIKUMAR, G.; RAO, L. P.. Friction Surfacing of Austenitic Stainless Steel on Low Carbon Steel, Studies on the Effects of Traverse Speed. **Proceedings of the World Congress on Engineering**, London (UK), v. 2, 2010.

RITCHER, W. *Herbeifuehrung einer haftverbindung zwischen plaettchen auswerkzeugstahl und deren traegern nach art einer schweissung oder loetung*. DE Patent N° 477084. 1929.

RODRIGUES, G. L. **Efeitos dos tratamentos térmicos em ligas de alumínio**. 2015. Programa de Bacharelado em Engenharia Mecânica – Universidade do Rio Verde. Rio Verde, 2015.

SAKIHAMA, H.; TOKISUE, H.; KATOH, K. Mechanical properties of friction surfaced 5052 aluminum alloy. **Materials Transactions**, v. 44, p. 2688-2694, 2003.

SANTO, J. M. R. **Estudo comparativo de utilização de SER, MIG/MAG e Friction Surfacing na reparação de braços de suspensão de VBTP-M113**. 2013. Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2013.

SHINODA, T.; LI, J. Q.; KATOH, Y.; YASHIRO, T. Effect of process parameters during friction coating on properties of nondilution coating layers. **Surface Engineering**, v. 14, n. 3, p. 211-216, 1998.

SUHODINN, U.; MIRONOV, S.; KROHN, H.; BEYER, M.; SANTOS, J. F. DOS, 2012. Microstrutural evolution during friction surfacing of dissimilar aluminum alloys. **Metallurgical Materials Transactions A: Physical Metallurgical Materials Science**, v. 43, n. 13, p. 5224-5231, ago. 2012.

TAGUCHI, G. **Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes**. 6. ed. Tokyo: The Organization. 1986.

TAVARES, S. S. **Soldagem por fricção convencional entre a liga de alumínio 6351-T6 e o aço SAE 1020 assistida por indução eletromagnética**. 2017. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2017.

TOBIAS, P. H. R.; SILVA, A. DA; MELO, M. L. N. M. Influência da temperatura de envelhecimento na tenacidade ao impacto da liga AA2024. IN: VI Conferência Brasileira sobre temas de tratamento térmico. **ANAIS da VI Conferência Brasileira sobre temas de tratamento térmico**. Atibaia: UNIFEI, 2012, v. 2.

TOKISUE, H.; KATOH, K. Mechanical Properties of 5052-2017 Dissimilar Aluminum Alloys Deposit by Friction Surfacing. **Materials Transactions: Japan Institute of Metals**, v. 47, n. 3, p. 874-882, Japan, 2006.

VERRAN, G. O.; MORAES, A. C.; VERRI, A. A. Influência da composição química na resistência a corrosão em ligas de alumínio de fundição. IN: XV Seminário de Iniciação Científica da UDESC, 2005, Joinville. **Anais do XX Seminário de Iniciação Científica da UDESC**. Joinville: UDESC, 2005, v.1.

VILAÇA, P.; GANDRA, J.; VIDAL, C., 2012. Linear friction based processing Technologies for aluminum alloys: surfacing, stir welding and stir channeling. In: **Ahmad, Z. (Ed.). Aluminium Alloys – New Trend in Fabrication and Applications**. In tech, Rijeka. Croatia, 2012.

VITANOV, V. I.; VOUTCHKOV, I. I.; BEDFORD, G. M. Decision support system to optimise the Frictec (Friction Surfacing) process. **Materials Processing Technology**, n. 107, p. 236242, 2000.

VOUTCHKOV, I. I.; JAWORSKI, B.; VITANOV, V. I.; BEDFORD, G. M. Na integrated approach to friction surfacing process optimisation. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 141, p. 26-33, 2001.

WANG, S. C.; STARINK, M. J. **Two types of S phase precipitates in Al-Cu-Mg alloy**. Corrosion Science, v.4, p. 933-941, 2007.

XIAO, D. H. et al. **Effect of Cu content on the mechanical properties of na Al-Cu-Mg-A alloy**. 2002. School of Materials Science and Engineering - Shanghai Jiao Tong University. Shanghai China, 2002.