

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DUREZA DO MATERIAL DEPOSITADO COMO  
PARÂMETRO DE ENTRADA EM PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO DE  
SUPERFÍCIE

por

Gabriel Ribeiro Brun

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Julho de 2024

### CIP - Catalogação na Publicação

Ribeiro Brun, Gabriel  
ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DUREZA DO MATERIAL  
DEPOSITADO COMO PARÂMETRO DE ENTRADA EM PROCESSO DE  
SOLDA POR FRICÇÃO DE SUPERFÍCIE / Gabriel Ribeiro  
Brun. -- 2024.  
27 f.  
Orientador: José Antônio Esmerio Mazzaferro.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Solda de fricção de superfície. 2. Dureza. 3.  
Solda. I. Esmerio Mazzaferro, José Antônio, orient.  
II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Gabriel Ribeiro Brun

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DUREZA DO MATERIAL DEPOSITADO COMO  
PARÂMETRO DE ENTRADA EM PROCESSO DE SOLDA POR FRICÇÃO DE  
SUPERFÍCIE

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA  
DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignacio Iturrioz  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. José Antônio Esmerio Mazzaferro (presidente)

Prof. Ignacio Iturrioz

Prof. Felipe Roman Centeno

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Porto Alegre, Julho de 2024

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a UFRGS por me proporcionar a oportunidade de estudar num curso de engenharia tão fascinante e completo como o de engenharia mecânica, gostaria de agradecer ao LAMEF como um todo, principalmente meus mentores, os engenheiros Matias Seyboth e Luiz Francisco Rodrigues Venturini e ao Prof. Marcelo Favaro Borges que foi responsável por mim durante minha passagem. Este trabalho foi feito em colaboração com o centro de pesquisa *Helmholtz-Zentrum Hereon*, um centro de pesquisa na Alemanha, onde tive a oportunidade de trabalhar como *undergraduate student researcher*, tal parceria só foi possível por um programa de intercâmbio oferecido pelo LAMEF da UFRGS, trabalhei 3 anos como bolsista de graduação. Gostaria de agradecer também a equipe do centro de pesquisa *Helmholtz-Zentrum Hereon*, principalmente aos meus mentores, os engenheiros Marius Hoffmann e Arne Roos e claro ao engenheiro Benjamin Klusemann, responsável pelo grupo de *Solid State Materials Processing*.

Ribeiro Brun, Gabriel. Estudo da influência da dureza do material depositado como parâmetro de entrada em processo de solda por fricção de superfície. 2024. 27 p. Projeto de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

## RESUMO

Solda por fricção de superfície ou *friction surfacing (FS)* é uma tecnologia de solda em estado sólido com aplicações cada vez mais comuns no ramo da engenharia. Este processo permite a junção de materiais dissimilares que seriam incompatíveis ou difíceis de depositar com os tradicionais métodos de solda por fusão. Vários estudos indicam sua eficiência energética e baixo impacto ambiental como as principais vantagens quando comparado com outras tecnologias. As principais aplicações incluem o reparo de superfícies com desgaste ou com algum dano, podendo também ser utilizado para melhorar as propriedades de uma dada superfície, já que esse processo é conhecido por produzir camadas de grãos finos com boas características de resistência ou desgaste e corrosão. Este trabalho foca no processo de *FS* com uma ideia investigativa, em uma primeira parte é feita a melhora dos parâmetros de solda: força axial, rotação e velocidade de translação para uma combinação de materiais. Em seguida é feita a avaliação se a dureza pré solda do material depositado exerce alguma influência nas características do depósito. A combinação escolhida foi de alumínio e aço, sendo o alumínio o material depositado, o trabalho foi feito em colaboração com o centro de pesquisa *Helmholtz-Zentrum Hereon* (<https://www.hereon.de/>).

**PALAVRAS-CHAVE:** Solda, Fricção, Alumínio, Aço.

Ribeiro Brun, Gabriel. Study of the influence of hardness of the deposited material as parameter in the process of Friction Surfacing. 2024. 27 p. Final Monograph Project of the Mechanical Engineering Course, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

## ABSTRACT

Friction surfacing (FS) is a solid-state technology with increasing applications in engineering. FS allows dissimilar joining of materials that would otherwise be incompatible or difficult to deposit by fusion-based methods. Several studies indicate its energy efficiency and low environmental impact as key advantages when compared with other alternative technologies. Main applications include repair of worn or damaged surfaces. It can also be used to enhance surface properties, since this process is known by producing fine grained coatings with excellent wear and corrosion properties. This study focuses on the FS process with an investigative approach, in a first session, the improvement of the weld parameters - axial force, rotation and translational speed – of a set material combination was performed. On a second session, a study has been conducted to determine if the hardness of pre-welded deposit material has any influence on the final characteristics of the deposit. The chosen material combination was aluminum into steel, with the aluminum being the deposited material. The study has been conducted in partnership with the *Helmholtz-Zentrum Hereon* (<https://www.hereon.de/>) research center.

**KEYWORDS:** Friction, Surfacing, Welding, Steel, Aluminum.

## NOMENCLATURA

### Símbolos

$F_z$	Força axial	[N]
$n$	Velocidade de rotação	[r.p.m.]
$V_x$	Velocidade translacional	[mm/s]
$v_z$	<i>Feed rate</i> ou taxa de consumo	[mm/s]
$t$	Tempo	[s]
$e$	Espessura da camada	[mm]
$\Delta_z$	Deslocamento em z	[mm]
$W_b$	Largura de deposição sem defeitos	[mm]
$\eta_{coat}$	Eficiência de deposição	[%]
$r$	Raio do pino	[mm]
$G$	<i>ASTM grain size Number</i>	Adimensional
$\bar{l}$	Comprimento médio linear de interceptação	[mm]
$L_T$	Comprimento total das linhas de interceptação	[mm]
$P$	Número total de interceptações	Adimensional
$M$	Magnificação	Adimensional
Abreviaturas e acrônimos		
FS	<i>Friction surfacing</i>	
HAZ	<i>Heated affected zone</i>	
OPS	<i>Oxide polishing suspensions</i>	
MEV	Microscópio eletrônico de varredura	

## Sumário

RESUMO.....	v
ABSTRACT .....	v
NOMENCLATURA.....	vi
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. <i>Friction Surfacing</i> .....	1
1.2. Revisão Bibliográfica.....	2
1.3. Objetivos .....	4
2. METODOLOGIA .....	4
2.1. Parâmetros para substrato de AISI4140 .....	4
2.2. Preparação para deposições.....	4
2.2.1. Preparação dos substratos .....	4
2.2.2. Tratamento térmico dos pinos.....	5
2.2.3. Averiguação da dureza dos pinos .....	5
2.3. Depósitos .....	5
2.3.1. Confecção de amostras .....	6
2.4. Análise das amostras e dados .....	7
2.4.1. Medição de dureza .....	7
2.4.2. Medição de temperatura .....	7
2.4.3. Microscopia .....	8
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	8
3.1. Parâmetros para substratos de AISI4140.....	8
3.2. Tratamento térmico dos pinos .....	9
3.3. Depósitos e amostras .....	10
3.4. Propriedades geométricas .....	10
3.5. Mapeamento da dureza.....	11
3.6. Resultados temperaturas .....	12
3.7. Análise de microestrutura.....	13
3.8. Compostos intermetálicos .....	14
4. CONCLUSÕES .....	14
5. REFERÊNCIAS .....	16
6. APÊNDICE A – Fotos das Deposições.....	18
6.1. Deposições em AISI4140 .....	18
6.2. Deposições em S355.....	19

## 1. INTRODUÇÃO

A engenharia mecânica é um campo de estudo muito amplo e diverso, abrangendo inúmeros temas técnicos fundamentais para o desenvolvimento da humanidade. Uma das tantas áreas que podem ser possivelmente estudadas é a área de soldagem, que ao longo dos anos provou-se indispensável na indústria, sendo essencial para reparo e montagem de peças. O primeiro método criado para a realização de soldas em escala industrial foi a solda por fusão com arco elétrico, que foi descoberta no século XVII e é amplamente utilizada até os dias atuais. Como todas as tecnologias, a solda por arco elétrico tem seus problemas e limitações como: uma maior probabilidade da existência de defeitos de solda, tensões residuais, dissimilaridade de materiais, necessidade de um metal de adição e proteção da poça de fusão.

Tendo em vista essas limitações, ao longo dos anos foram descobertas e inventadas diversas tecnologias alternativas de junção de materiais, como solda a laser, solda em estado sólido, solda por plasma, solda por ultrassom e por fim, as soldas por fricção.

A solda por fricção convencional é conhecida desde pelo menos 1891, porém só começou a ter um interesse maior após 1957, quando foram publicadas experiências realizadas na (ex) U.R.S.S. desde então este processo de solda vem sendo utilizado industrialmente (MACHADO, 1996). Quando se fala do processo conhecido como soldagem por fricção e mistura mecânica ou mais conhecida como *Friction Stir Welding* (FSW), Nee e Mehrdad (2015) apontam que este processo originalmente foi descoberto em 1991 por Wayne Thomas no *The Welding Institute* (TWI) em Cambridge Reino Unido. Seu princípio de funcionamento é basicamente o que seu nome se refere, dois materiais são aquecidos por fricção relativa e plastificados. Neste estado de plastificação é possível que os dois materiais se misturem e se unam. A finalidade da solda por fricção é a de superar desafios associados a métodos tradicionais de soldagem, especialmente em ligas de alumínio e materiais termoplásticos, que apresentam problemas nas soldas por fusão, como a tendência a formar óxidos. Seguem algumas das vantagens deste tipo de processo: Menor distorção térmica, baixo aporte energético, soldagem de materiais dissimilares, alta qualidade da junta.

Atualmente as soldas por fricção já são muito utilizadas em várias indústrias como a indústria Aeroespacial, que necessita da capacidade de unir materiais de baixa densidade como ligas de alumínio e titânio, sem comprometer suas propriedades. Na indústria ferroviária a solda por fricção também é utilizada para fabricação de trilhos e estruturas de vagões, sendo útil pois produz juntas de alta qualidade. Também é notada a utilização na indústria naval, onde é necessário garantir juntas resistentes e duráveis e se utiliza muitas ligas de baixa densidade.

### 1.1. *Friction Surfacing*

*Friction Surfacing* (FS) ou também deposição superficial por fricção é uma das ramificações dos tipos de solda por fricção até então descobertos, semelhante a FSW, está situada no tema central deste trabalho. Para realizar uma solda por FS é necessário a presença de dois materiais, o material de maior dureza, chamado de substrato e o material de menor dureza, chamado geralmente de pino. Conforme ilustrado na Figura 1, para realizar a deposição o pino deve ser girado em relação ao seu eixo central e ser pressionado contra o substrato até plastificar, quando a plastificação começa, a mesa onde está o substrato se move horizontalmente, depositando o material do pino no substrato.

O método utilizado para fricção em FS é composto por 3 parâmetros principais de entrada: A força axial do pino no substrato ( $F_z$ ), a velocidade rotacional do pino ( $n$ ) e a velocidade translacional da mesa ( $V_x$ ), todas as deposições feitas com FS dependem do ajuste destes 3 parâmetros para se obter uma deposição de qualidade e homogênea (GANDRA *et al.*, 2014).



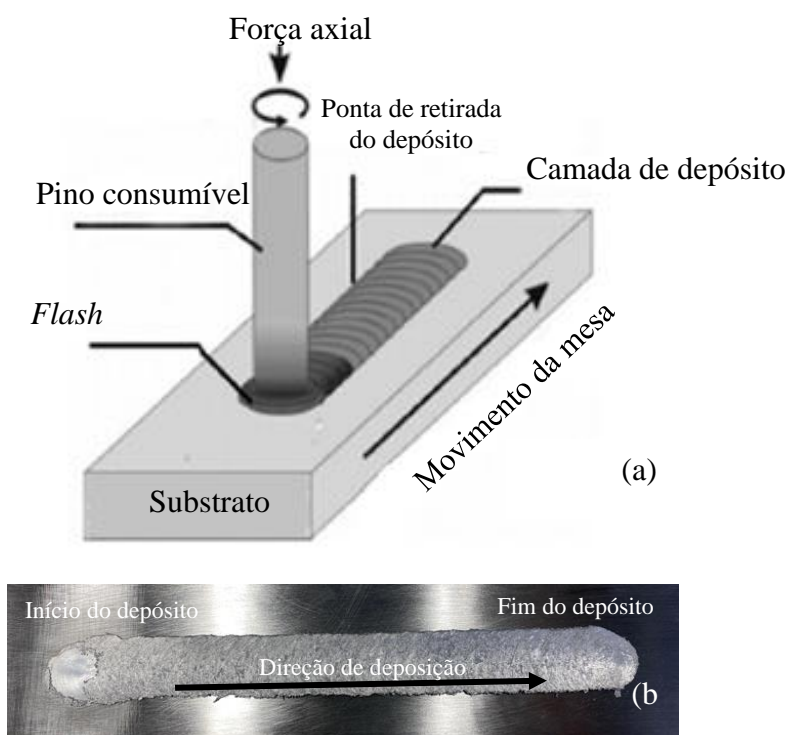


Figura 1. (Sahoo et al. 2019)[adaptado]. Em (a) é ilustrado um desenho esquemático do processo de *friction surfacing*(FS) e seus parâmetros, já em (b) se vê um típica deposição de alumínio em aço.

Como resultado desta deposição se obtém camadas homogêneas com grãos finos, que possuem propriedades superiores contra corrosão e desgaste, além do fato de não degradar as propriedades originais do material, devido a sua baixa aplicação de energia (GANDRA *et al*, 2014). Outro resultado característico é a formação do *flash* no pino depositado, que é o residual do material não depositado que geralmente tem uma forma de cogumelo (Figura 2).

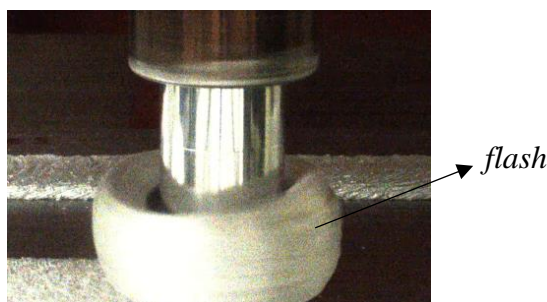


Figura 2. Foto da deposição por FS e consequentemente da formação do *flash*.

## 1.2. Revisão Bibliográfica

Apesar da área de *FS* não ser tão nova, a maior parte dos estudos foi feita recentemente, não existindo então uma literatura ou norma específica que é amplamente utilizada, portanto este estudo se baseia basicamente em artigos publicados no assunto e na experiência dos profissionais envolvidos em apoiá-lo.

Como referência principal, será utilizado o estudo feito por Gandra *et al* (2014), este trabalho é basicamente uma enciclopédia para quem trabalha com *FS*. O trabalho mencionado aborda o processo de *FS* como um todo, primeiramente é dado um contexto histórico e as vantagens do processo, como as excelentes propriedades mecânicas ou pouca tensão residual, secundamente

são definidos os parâmetros principais de caracterização das deposições assim como descrevendo o efeito geral causado pela mudança dos mesmos. Também é feito um compilado da maioria dos trabalhos já realizados na área, listando as várias combinações de materiais com sucesso nas deposições ex. Ti, Cu, Mg, Al, aço. São definidos ou mostrados quais devem ser as aparências base de uma boa deposição, assim como a aparência base do *flash*.

Neste trabalho também são definidas algumas propriedades importantes do processo de FS, dessas propriedades se utiliza principalmente a taxa de consumo do pino ou *feed rate* que é definida como a velocidade que o pino consumível é empurrado ao longo da sua direção axial contra o substrato e pode ser calculado da seguinte maneira:

$$v_z = \frac{\Delta z}{t} \quad (1)$$

Também será utilizado o conceito de eficiência da deposição, definida como a porcentagem de material do pino que é realmente depositada que é calculada da seguinte maneira:

$$\eta_{coat} = \frac{W_b \cdot e \cdot V_x}{\pi \cdot r^2 \cdot v_z} \cdot 100\% \quad (2)$$

Uma parte que é essencial para o avanço do trabalho seria definir qual a metodologia para o tratamento térmico que será feito nos pinos de AA6082, e conforme o estudo de Osten *et al* (2015), a melhor forma de alterar as durezas seria utilizando dois métodos, uma primeira etapa de *annealing* ou recozimento, onde os pinos serão inseridos em um forno à 525 °C por 30 a 45 minutos, tendo ao final uma dureza inferior à inicial. A segunda etapa consiste em aumentar a dureza, alguns materiais e ligas como Al, Cu e Zn possuem a propriedade conhecida como envelhecimento natural, a mesma consiste no endurecimento do material após alguns dias do seu tratamento térmico inicial. O que foi feito no estudo é um envelhecimento artificial, colocando os pinos em um forno à 190°C por 8 horas, acelerando assim o processo que levaria dias, para obter uma dureza final superior à original.

Em relação à temperatura do processo Kallien *et al* (2020) e Kallien *et al* (2021) observam os efeitos da temperatura nas características geométricas de deposições de Alumínio, assim como os efeitos da troca de parâmetros na temperatura de deposição, também a ideia de utilizar uma câmera infravermelha para a medição de temperatura se originou destes estudos.

K. Badheka e V. Badheka (2016) estudam a viabilidade das deposições de ligas de alumínio em substratos de aço, já Sahoo, Chari, Reddy (2019) e Kumar, Redy e Mohandas (2014) estudam os parâmetros ótimos para uma boa deposição de Alumínio em aço.

Para cálculo de tamanhos de grãos, *American society for testing and materials international* (2013) indica diversas maneiras de estimar e quantificar o tamanho de grão a partir de fotos feitas em microscópios. Dentre os métodos mencionados pela norma, o escolhido para utilização neste trabalho foi o método de interceptação, onde o objetivo é encontrar o número de tamanho de grão “G”. Este número pode ser encontrado traçando linhas de tamanho conhecido nas imagens dos conjuntos de grãos, contando as interceptações em contornos de grãos ao longo de seus comprimentos e utilizando as seguintes expressões:

$$G = -3,2877 - 6,6439 * \log_{10}(\bar{l}) \quad (3)$$

$$\bar{l} = \frac{L_T}{P * M} \quad (4)$$

Onde  $G$  é o número de tamanho de grão ASTM,  $\bar{l}$  é comprimento médio linear de interceptação,  $L_T$  é o comprimento total das linhas utilizadas,  $P$  é o número total de interceptações e  $M$  é a magnificação utilizada.

Sahoo, Mohanty e Echempatti (2020) observam somente o efeito da rugosidade superficial do substrato e seus efeitos na qualidade das deposições de alumínio em aço, exemplificando o quão sensível é esse processo de soldagem e como qualquer mudança pode influenciar no resultado final.

Compostos intermetálicos são formados por dois ou mais componentes metálicos e que aumentam consideravelmente as propriedades mecânicas do material em questão. Especificamente para o processo de *FS* de aço em alumínio são conhecidos pela sua alta resistência a corrosão e altas temperaturas, (TROYSI e BRITO, 2020). LI (2019) também investiga a formação desses compostos em deposições de alumínio em aço e encontra a presença de  $FeAl_3$  nas camadas depositadas.

### 1.3. Objetivos

Os objetivos desde estudo são de caráter investigativo, tendo em vista que existem poucos trabalhos publicados e literatura sobre o assunto em questão, será uma ótima oportunidade de contribuir com a comunidade acadêmica e aprofundar no assunto de *FS*. Primeiramente para serem obtidos resultados nas deposições de alumínio AA6082 em aço AISI4140, deve-se encontrar os parâmetros para a realização das deposições, para isso serão feitas algumas deposições testes somente para ajuste de parâmetros. Para a combinação de pinos de AA6082 e substratos de aço S355 isso não será necessário, visto que os parâmetros para realização da deposição já foram previamente estudados por alunos de mestrado e doutorado e o conhecimento foi compartilhado como contribuição para este estudo.

Após feita a adequação de parâmetros, deverá ser adotada uma metodologia de tratamento térmico para a alteração da dureza dos pinos de AA6082. Após a realização das deposições necessárias para o estudo, será feito um trabalho de análise de tamanho de grão e de ensaios de durezas a fim de encontrar mudanças nas características finais dos depósitos e, se possível, correlacioná-las ou não à mudança inicial de dureza dos pinos. Também será avaliada a presença ou não de compostos intermetálicos, os quais são indicativos de ótimas propriedades do material.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Parâmetros para substrato de AISI4140

Para ser feita a investigação da influência da dureza inicial dos pinos nas deposições em ambos os substratos de aço, primeiramente definiu-se os parâmetros de deposição para a combinação de AA6082 e AISI4140.

Como ponto de partida, foram utilizados parâmetros similares à combinação de AA6082 e aço S355, algumas deposições teste foram feitas, variando os parâmetros de velocidade transversal, velocidade rotacional do pino e força axial até o resultado ser uma deposição satisfatoriamente homogênea.

### 2.2. Preparação para deposições

Ao longo deste trabalho, foram realizadas diversas atividades com o auxílio de equipamentos específicos, em seguida será feita uma breve descrição de cada um deles.

#### 2.2.1. Preparação dos substratos

Primeiramente, foi adquirido o material para realização das deposições, tanto os substratos de aço quanto os pinos de alumínio foram cortados nas dimensões desejáveis.

Após a aquisição dos materiais, foi feita a preparação dos substratos de aço, os mesmos foram usinados para terem uma superfície plana e lixados manualmente com lixa 120 horizontalmente, (ARNE ROOS, 2023) mostra que ao preparar um substrato de aço para deposição de alumínio, dentre os métodos de preparação topográfica de lixamento e fresamento do substrato, o depósito que apresenta as melhores propriedades como relação entre largura de zona de união/largura do depósito é o substrato que foi preparado com lixamento horizontal.

### 2.2.2. Tratamento térmico dos pinos

Foram realizados dois tratamentos térmicos nos pinos de AA6082 com o objetivo de obter pinos de durezas diferentes, foi feita uma adaptação do estudo de Osten *et al* (2015) respeitando as limitações nos equipamentos do laboratório, conforme ilustrado na Figura 3.

Para obter os pinos de menor dureza, realizou-se um processo de recozimento onde os pinos foram aquecidos em um forno industrial até uma temperatura de 525 °C durante 45 minutos, posteriormente foram resfriados em água a temperatura ambiente. Já para obter os pinos de maior dureza realizou-se um processo de envelhecimento artificial, conforme já descrito anteriormente.

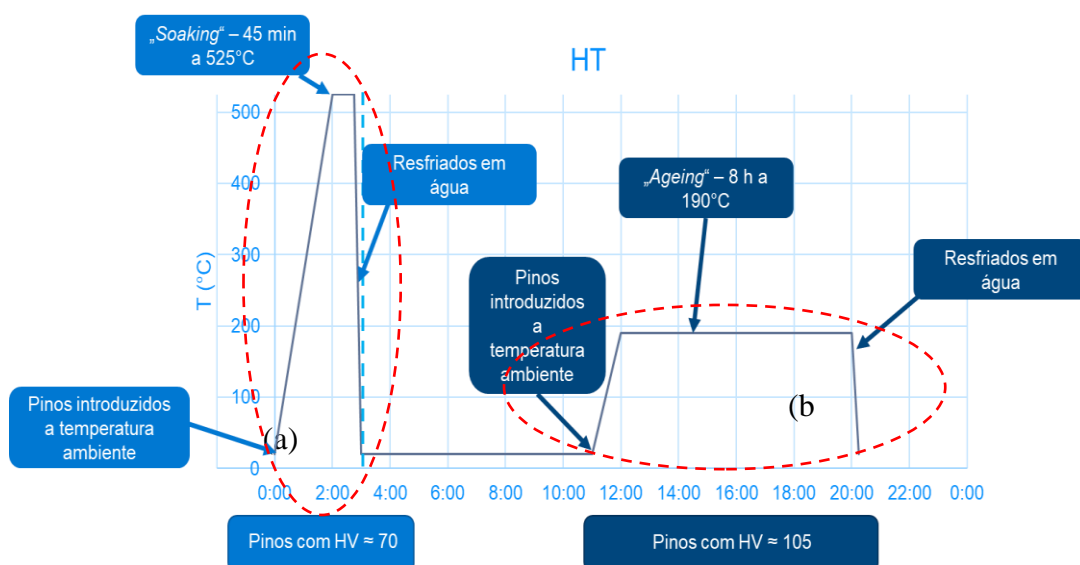


Figura 3. Gráfico informativo do tratamento térmico dos pinos de alumínio, na região (a) é representado o recozimento dos pinos e na região (b) é representado o envelhecimento artificial dos pinos.

### 2.2.3. Averiguação da dureza dos pinos

Para averiguação e confirmação da dureza e microestrutura dos pinos, foram cortadas 6 amostras das seções transversais de cada tipo de pino (Sem tratamento térmico, com tratamento de recozimento, com tratamento de envelhecimento artificial).

As amostras foram cortadas em uma altura intermediária do comprimento dos pinos uma foi utilizada para uma averiguação da dureza e a outra para análise e averiguação de microestrutura.

### 2.3. Depósitos

Os depósitos foram feitos em uma máquina chamada RAS que é uma máquina projetada especificamente para realizar deposições de FS a mesma pode ser vista na Figura 4.

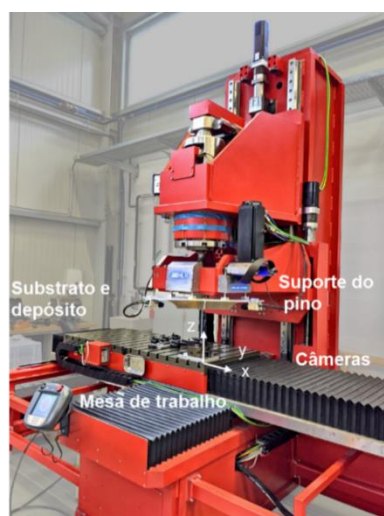


Figura 4. Máquina de FS RAS e seus componentes.

A mesa possui as seguintes capacidades:

Força axial: 0-60 kN, velocidade de rotação: 0-6000 rpm, velocidade de translação: 0-20 mm/s, torque: 0- 200 Nm, espaço de trabalho: 0,0x1,5 m, diâmetro máximo do pino: 30 mm.

Essas características da máquina são suficientes para cobrir a maioria das deposições e combinações de materiais já estudadas na literatura, não apresentando nenhum tipo de limitação para este estudo.

Os parâmetros escolhidos para cada combinação de material foram os que se obtinha a deposição com mais qualidade. Para os substratos de S355 foram utilizados os parâmetros obtidos em um estudo anteriormente feito no centro de pesquisa, porém ainda não publicado, para Força axial foi utilizado 5,5 kN, para velocidade rotacional foi utilizado 1500 RPM durante todo o processo, para velocidade translacional foi utilizado 14 mm/s. Já os parâmetros para os substratos de AISI4140 foram obtidos experimentalmente, após uma bateria de testes e ajustes de parâmetros tendo como ponto de partida os parâmetros utilizados nos substratos de S355.

### 2.3.1. Confeção de amostras

As amostras a serem utilizadas posteriormente às deposições foram feitas a partir de uma deposição completa, cortando seções transversais com uma espessura de aproximadamente 10 mm na região de fase estável do depósito (Figura 5).

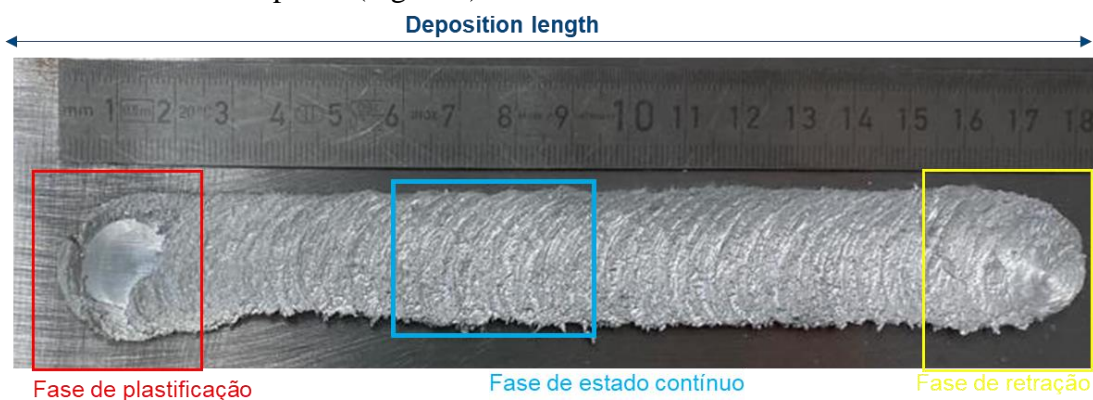


Figura 5. Representação do depósito e suas fases.

As amostras foram cortadas em uma cortadora metalográfica. Após feito o corte, as amostras foram devidamente identificadas e separadas. A separação das amostras se deu da seguinte maneira:

\*2 amostras por depósito para mapeamento de dureza da camada de deposição;

\*2 amostras por depósito para avaliação de geometria de camada e granulação.

A razão da existência de mais de uma amostra por depósito é para melhorar a confiabilidade do resultado, como o processo de FS não deixa uma superfície 100% homogênea, tendo duas amostras se obtém um resultado das geometrias e durezas mais confiável.

Após cortadas as amostras passaram por um processo de embutimento com uma resina padrão e posteriormente polidas gradualmente, utilizando lixas 80, 220, e pratos de polimento com soluções diamantadas de  $3\mu$  e  $1\mu$  e OPS nesta respectiva sequência, em uma politriz metalográfica.

## 2.4. Análise das amostras e dados

Após a realização dos depósitos e confecção das amostras, foi necessário realizar o mapeamento de dureza, a avaliação de microscopia e tratamento de dados das deposições.

### 2.4.1. Medição de dureza

O mapeamento de dureza foi feito com o auxílio do equipamento disponível no laboratório, *struers durscan*. O teste utilizado foi o teste de dureza Vickers (HV 0,2), já que o mesmo pode ser utilizado para vários materiais diferentes com o mesmo indentador.

### 2.4.2. Medição de temperatura

A medição de temperatura durante o processo de deposição foi feita de duas maneiras, já que conforme experiência prévia existe uma grande dificuldade de medir a temperatura do processo de maneira correta. A primeira maneira consiste em uma série de termopares colocados em sequência em uma linha reta onde a deposição ocorre (Figura 6 b), para isso foi necessário realizar furos no substrato para se chegar o mais perto possível da interface de deposição. A segunda maneira consiste na utilização de uma câmera infravermelha, que foi colocada no mesmo nível do substrato na hora da deposição (Figura 6 a).

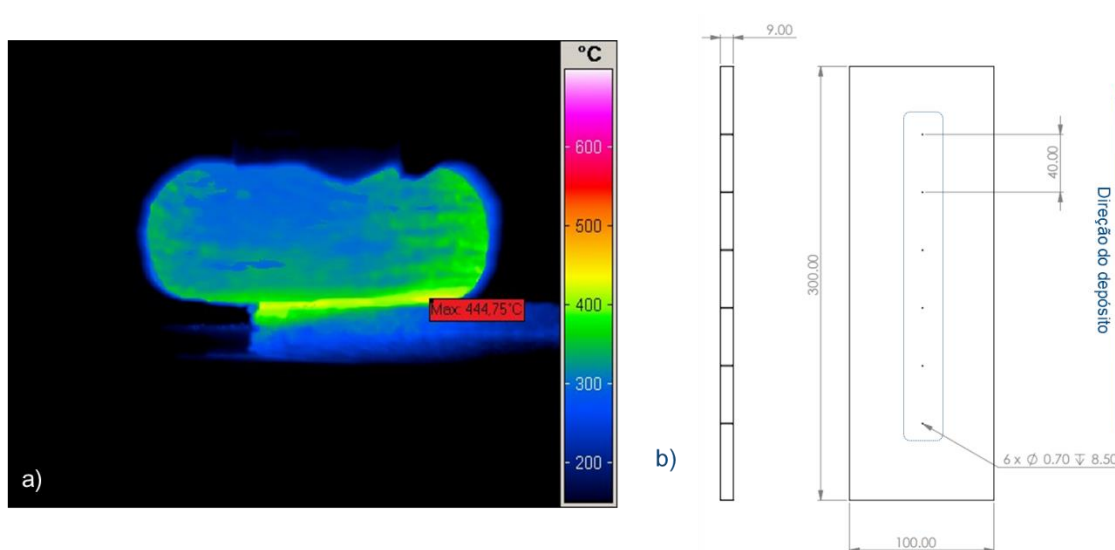


Figura 6. a) Ilustração da medição pela câmera infravermelha, b) desenho indicando posição em que os termopares foram posicionados no substrato.



### 2.4.3. Microscopia

A análise microscópica foi conduzida com um microscópio do fabricante Leica, tendo sido feita uma imagem de mapeamento inicial para determinar as propriedades geométricas de largura e espessura da camada de deposição. A espessura foi medida em 5 pontos equidistantes e registrada uma medida média. A largura consiste de duas medidas, uma medida é a largura sem defeitos e a outra a largura total da deposição.

Para a análise de tamanho de grão. Foi realizado um ataque químico da face polida da amostra para ser possível diferenciar os grãos no microscópio posteriormente. Para fins de quantificação foi utilizado o método de interceptação para determinação do “número de tamanho de grão G”, tal método é descrito por *American society for testing and materials international* (2013).

Para a avaliação da existência de compostos intermetálicos foi utilizado um Microscópio eletrônico de varredura (MEV), pois esse possui uma capacidade muito superior de ampliação que é necessária para essa tarefa.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1. Parâmetros para substratos de AISI4140

Para encontrar os parâmetros que possibilitavam a solda dessa combinação de materiais, inicialmente tentou-se utilizar os mesmos parâmetros utilizados nas deposições em substratos de S355, esses parâmetros foram os seguintes:

$$F_z = 5,5 \text{ kN} \quad (3)$$

$$n = 1500 \text{ RPM} \quad (4)$$

$$V_x = 14 \text{ mm/s} \quad (5)$$

Após a realização de alguns testes iniciais, foi possível indicar que todas as deposições apresentavam o mesmo tipo de defeito, como pode ser observado na Figura 7. Como se pode observar, em ambos os casos a deposição demora para se iniciar, ficando grande parte do processo com uma deposição não homogênea ou sem deposição alguma, após algumas discussões foi concluído que isso poderia estar ligado ao fato de que na fase de plastificação não havia energia suficiente para quando a mesa começasse a se mover, o material do pino se depositasse imediatamente.



Figura 7. Deposições testes de AA6082 em AISI4140, utilizando os parâmetros originais utilizados em substratos de S355

Para resolver este problema foi necessário ajustar os parâmetros utilizados, como o processo é muito sensível a qualquer troca de parâmetro, a aproximação utilizada foi aumentar

a energia do processo na fase de plastificação, algo que na época já tinha sido testado por uma aluna de doutorado do laboratório.

Para atingir esse objetivo, foram feitos testes gradualmente aumentando a velocidade de rotação do pino somente na fase de plastificação, mantendo a velocidade rotacional original quando a mesa começa a se mover. Em um trabalho, agora já publicado, de ROOS *et al* (2023) é explicado a relação entre o aumento da velocidade rotacional na fase de plastificação para melhores resultados na deposição.

O resultado dos testes pode ser visto na Figura 8, no depósito **a)** há a falta de depósito na região de plastificação e na área de transição com os parâmetros originais. No depósito **b)** pode-se observar a falta de deposição na área de plastificação e uma deposição homogênea na área de transição e de estado contínuo. No depósito **c)** é visível o aumento de depósito na área de plastificação e maior homogeneidade no depósito como um todo.

Após a realização dos testes se definiu que os parâmetros para as deposições em aço AISI4140 seriam as mesmas das utilizadas em substratos de S355 com a alteração da velocidade de rotação na fase de plastificação para 2500 RPM.

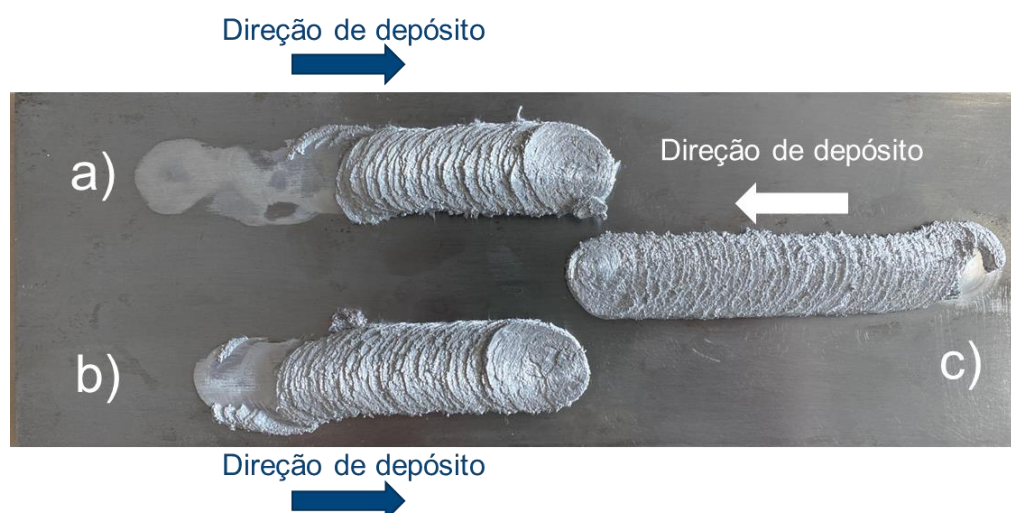


Figura 8. Vista superior dos depósitos em substrato de ANSI4140, a)  $V_x = 1500$  RPM, b)  $V_x = 2000$  RPM, c)  $V_x = 2500$  RPM.

### 3.2. Tratamento térmico dos pinos

Os pinos de AA6082 foram submetidos ao tratamento térmico, tendo como resultado do tratamento de recozimento pinos com dureza média de 70 HV 0,2, já os pinos que foram submetidos ao tratamento de envelhecimento artificial ficaram com uma média de 105 HV 0,2, os pinos originais tinham uma dureza média de em torno de 90 HV 0,2.

Foi então feita uma avaliação dos pinos em relação a suas microestruturas e durezas (Figura 9) conforme previamente descrito na sessão da metodologia. Pode-se observar que os pinos recozidos apresentaram a menor dureza com grãos bem grandes, já os pinos que passaram pelo envelhecimento artificial apresentaram a maior dureza final além de grãos finos com exceção dos grãos perto do seu diâmetro externo. Os pinos que não passaram por tratamento térmico nenhum apresentaram uma dureza intermediária e grãos finos na totalidade da sua sessão transversal.



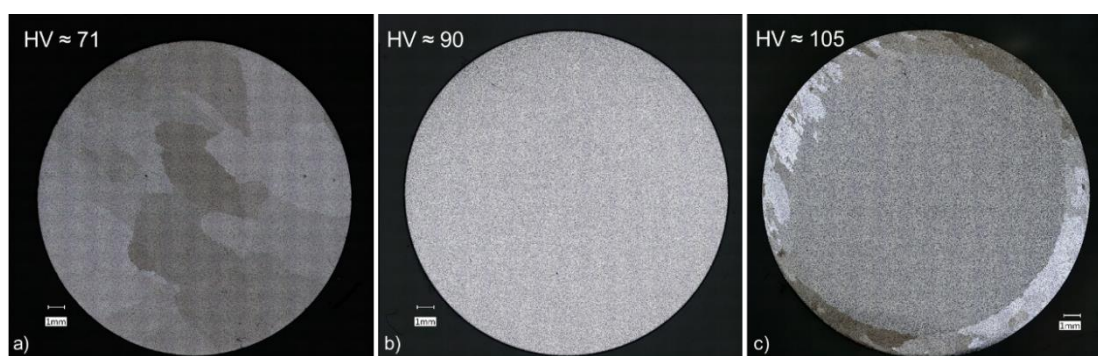


Figura 9. Sessões transversais dos 3 tipos de pinos onde a) é um pino que passou pelo tratamento de recozimento b) um pino original e c) um pino que passou pelo tratamento de envelhecimento artificial.

Nesta etapa, pode-se afirmar que os objetivos foram alcançados já que como resultado foram obtidos 3 conjuntos de pinos com aspecto microestrutural e faixas de dureza diferentes.

### 3.3. Depósitos e amostras

Os substratos foram preparados e furados para a introdução dos termopares e então as deposições foram feitas. Por conta das limitações de material, calendário e disponibilidade da máquina RAS foi possível realizar 6 deposições, 3 nos substratos de S355 e 3 nos substratos de AISI4140, das 3 deposições cada uma foi feita com um pino com uma faixa de dureza diferente.

As fotos das deposições podem ser vistas na sessão do APÊNDICE A, com a designação de qual substrato foi utilizado e qual faixa de dureza de pino foi utilizada.

### 3.4. Propriedades geométricas

Para a análise de propriedades geométricas foram cortadas duas amostras de cada depósito e medidas seus resultados podem ser vistos na Figura 10 e na Figura 11.

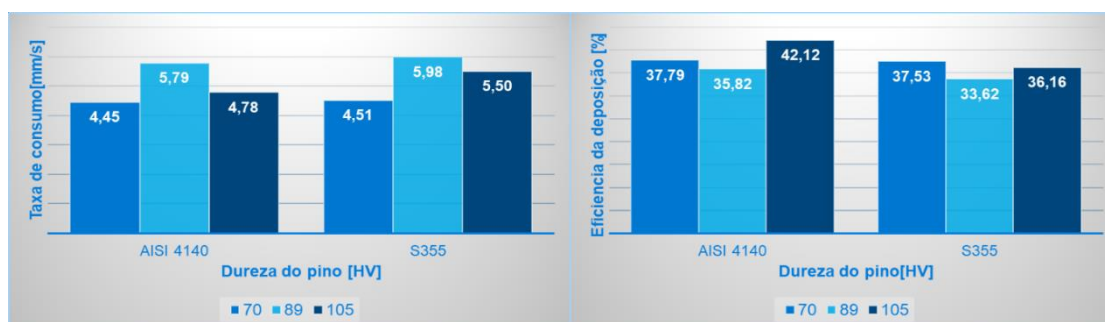


Figura 10. Resultados das propriedades geométricas de taxa de consumo e eficiência da deposição, separadas por substrato e dureza do pino utilizado.

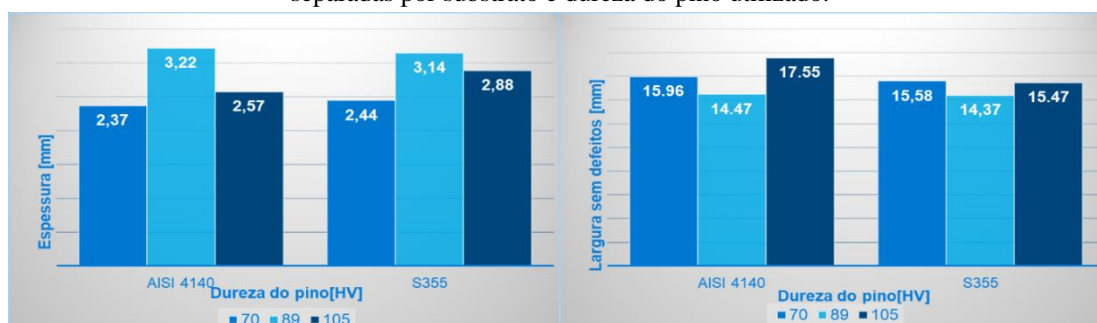


Figura 11. Resultados das propriedades geométricas de espessura de deposição e largura sem defeitos, separadas por substrato e dureza do pino utilizado.

Pode-se observar que a dureza dos pinos não influencia diretamente as propriedades geométricas medidas, porém pode-se afirmar que os depósitos provenientes de pinos que foram submetidos a qualquer um dos processos de tratamento térmico tiveram um comportamento a parte, independente do substrato utilizado.

Observa-se na Figura 10 que as maiores taxas de consumo e menores eficiências de deposição foram em depósitos com pinos não tratados termicamente. Na Figura 11 por outro lado, as maiores espessuras de camada depositada foram em depósitos com pinos não tratados termicamente, com a contrapartida de terem as menores larguras sem defeitos.

### 3.5. Mapeamento da dureza

Para a análise de dureza, foram cortadas duas amostras de cada depósito e feito um padrão de indentação de em média 250 pontos por amostra, dando ênfase na camada depositada e na interface do depósito, na orientação “X” foi utilizado um espaçamento de 0,5 mm e 5 indentações por linha, já na orientação “Y” foi utilizado um espaçamento de 0,25 mm e o número de indentações por coluna era dependente da espessura da camada depositada. A dureza média encontrada em cada tipo de substrato foi de aproximadamente 165 HV 0,2 nos substratos de S355, e 198 HV 0,2 nos substratos de AISI4140.

Tabela 1. Resultados de dureza das camadas de deposições, desvio padrão e o comportamento da dureza ao longo da camada.

Deposição	Dureza média da camada [HV 0,2] [+ 0.005 HV 0,2]	Desvio padrão na camada [HV 0,2]	Tendência da dureza
S355 70 HV 0,2	72.60	2.03	Aumenta
	73.85	1.77	Aumenta
S355 90 HV 0,2	73.08	2.48	Se mantém
	71.79	1.98	Se mantém
S355 105 HV 0,2	74.58	3.75	Aumenta
	73.64	2.70	Aumenta
AISI4140 70 HV 0,2	79.25	3.38	Aumenta
	80.74	6.73	Aumenta
AISI4140 90 HV 0,2	73.75	2.54	Aumenta
	76.85	3.71	Aumenta
AISI4140 105 HV 0,2	76.63	2.74	Se mantém
	75.29	1.72	Aumenta

Conforme pode-se observar na Tabela 1, não foi comprovada uma relação direta do tipo de pino utilizado e a dureza média da camada depositada, o que pode ser observado é que o que influencia a dureza média da camada é o tipo de substrato, nos substratos com material base mais duro (AISI4140) a dureza encontrada na camada de deposição foi substancialmente maior que nos substratos com material base de menor dureza (S355).

Olhando para os gráficos da Figura 12 e Figura 13, existe uma linha pontilhada que representa a interface entre o depósito e o substrato, à medida que os pontos vão para a direita da linha, eles representam pontos cada vez mais acima da interface (direção Y). Cada ponto representado no gráfico remete à um valor médio local da dureza de todas as indentações na mesma posição Y, por exemplo, os pontos no gráfico de cada curva na posição 0,5 são na verdade um valor médio das medidas de dureza em várias posições X que estão à mesma distância da interface.

Se observa o comportamento da dureza da camada à medida que se distancia da interface com o substrato, em ambos os substratos a grande parte das amostras o valor da dureza apresentou

crescimento à medida que se distancia da interface, novamente não tendo uma relação direta com o tipo de pino utilizado na deposição.

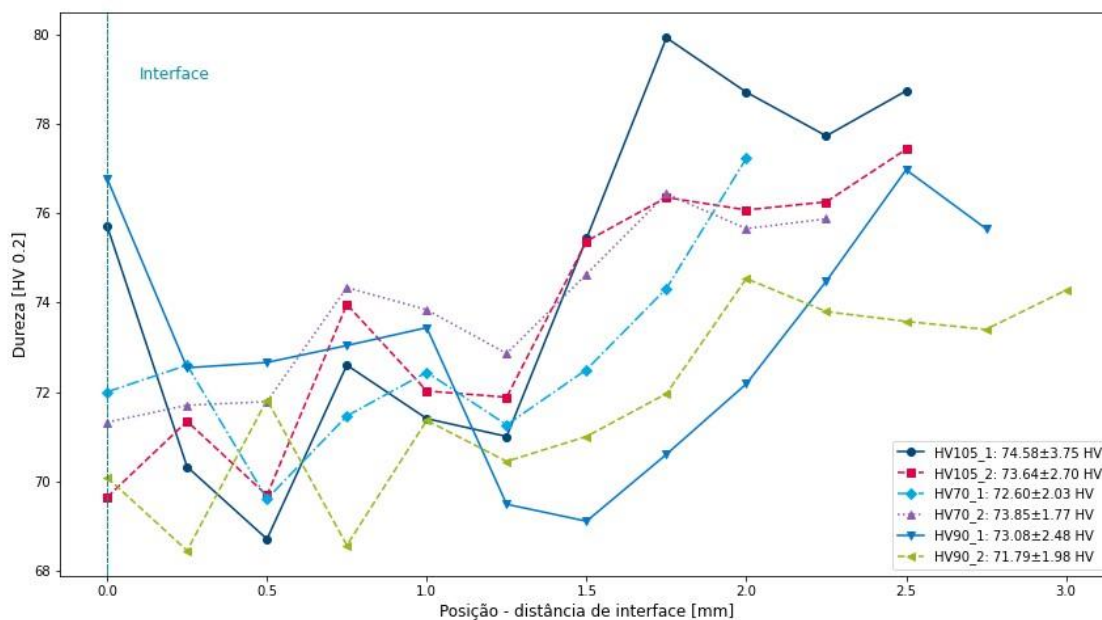


Figura 10. Perfil de dureza das amostras de depósitos em substratos de AISI4140, a linha vertical no ponto 0.0 indica a interface com o substrato e os valores representam a dureza média por posição até o fim do depósito.

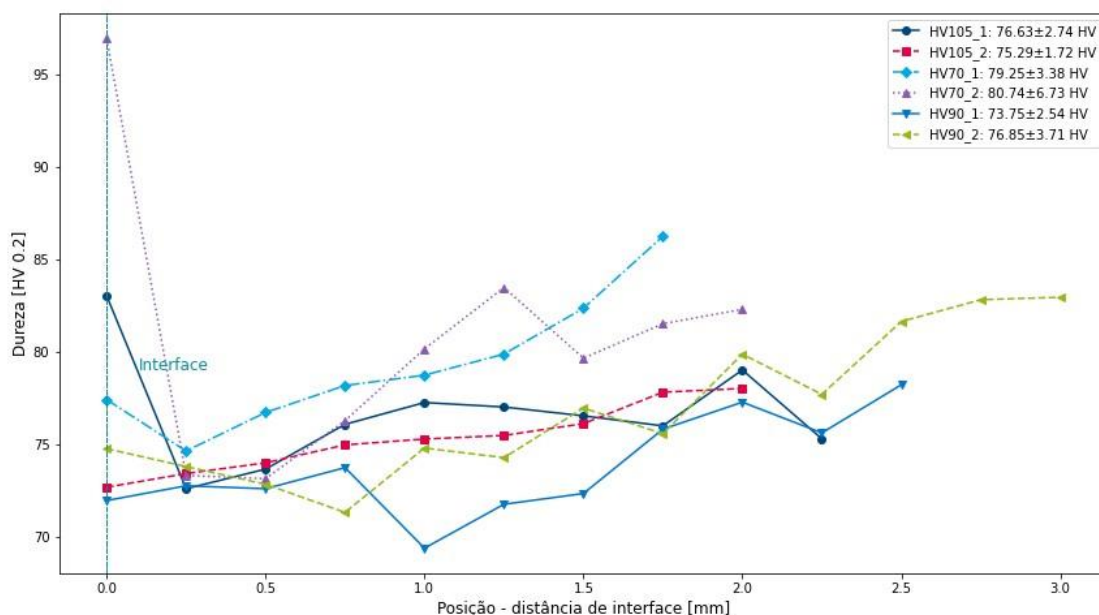


Figura 11. Perfil de dureza das amostras de depósitos em substratos de S355, a linha vertical no ponto 0.0 indica a interface com o substrato e os valores representam a dureza média por posição até o fim do depósito.

### 3.6. Resultados temperaturas

As medições de temperatura foram feitas, seus valores podem ser conferidos na Figura 14. As temperaturas médias dos termopares apresentaram uma variação maior, provavelmente devido à dificuldade de implementar essa medição e suas dificuldades durante o processo

(termopares soltos e distantes da interface), principalmente as deposições de 105 HV 0,2 em S355 e de 70 HV 0,2 em AISI4140.

Dureza	S355		AISI4140	
	Temperatura média TP [ $\pm 0,05$ °C]	Temperatura média IV [ $\pm 0,005$ °C]	Temperatura média TP [ $\pm 0,05$ °C]	Temperatura média IV [ $\pm 0,005$ °C]
70	378,9	412,6	318,6	416,9
90	384,8	413,5	370,7	416,7
105	303,5	416,8	381,3	425,1

Figura 12. Temperaturas médias obtidas com termopares (TP) e câmera infravermelha (IV) durante os processos de FS realizados.

As medições com a câmera infra-vermelho foram feitas considerando as propriedades dos materiais específicos que estavam sendo utilizados nos depósitos, sendo feita a calibração do equipamento antes das medições considerando a variabilidade da emissividade com a temperatura de cada um dos materiais envolvidos. Calibrações essas que foram desenvolvidas e validadas experimentalmente em experimentos prévios para o mesmo tipo de processo.

As medições da câmera infra-vermelho foram as que tiveram os resultados mais consistentes e confiáveis, sendo que praticamente todas as deposições tiveram uma temperatura média durante a deposição muito semelhante, algo em torno de 415 °C. A única deposição que apresentou alguma variação significativa foi a deposição com o pino de 105 HV no substrato de AISI4140, que apresentou valores um pouco acima do padrão.

### 3.7. Análise de microestrutura

Quando se trata do processo de *FS* um dos aspectos mais importantes de se verificar é o tamanho de grão e como este é influenciado pelos parâmetros de deposição. Tendo isto em mente, foram confeccionadas uma amostra por depósito e feito um ataque químico para tornar possível a visualização dos grãos em microscópio, para verificar o tamanho e grão, foram analisadas amostras do centro da camada depositada, conforme indica a Figura 15.

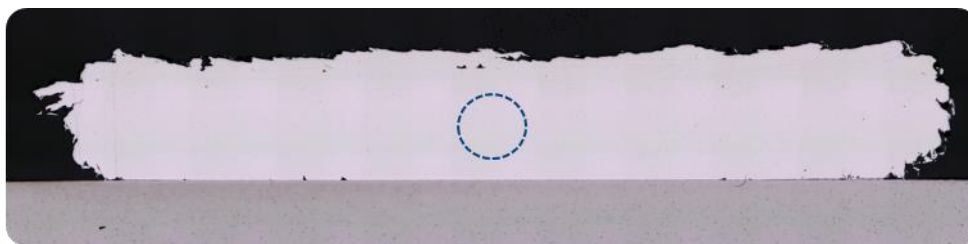


Figura 13. Região de onde foram retiradas as imagens para comparação e tamanho de grão.

As comparações entre as deposições em S355 são vistas na Figura 16 e as deposições em AISI4140 são vistas na Figura 17. Em ambas as imagens são mostrados os números de tamanho de grão ASTM “G” encontrados utilizando o procedimento descrito pela norma.



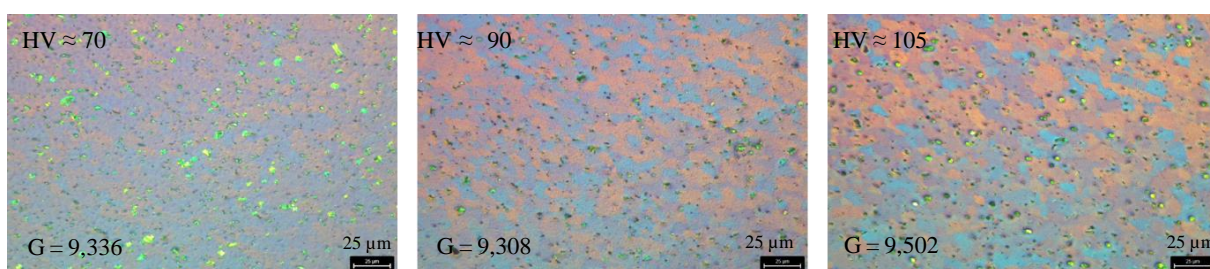


Figura 14. Comparação de grãos na região central das deposições em S355.

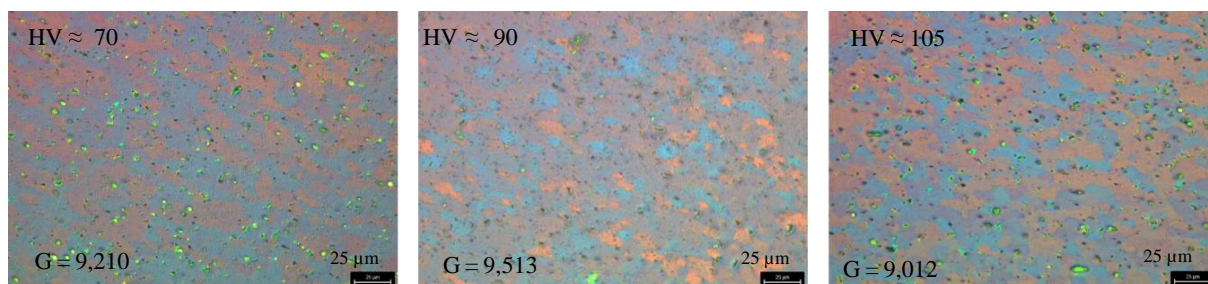


Figura 15. Comparação de grãos na região central das deposições em AISI4140.

Se observa que não houve diferença em tamanho de grão, ou seja, nestas deposições o tamanho de grão não foi influenciado tanto pela dureza do pino quanto pela combinação de material. O que se mostra estar correto, já que a energia é constante a taxa de resfriamento e a temperatura de plastificação são constantes, resultando em uma microestrutura semelhante.

### 3.8. Compostos intermetálicos

Para verificar se os depósitos realizados apresentavam algum composto intermetálico na sua composição, foi necessário utilizar um microscópio com a tecnologia MEV, para ter a magnificação necessária para identificar tais compósitos.

Pode-se observar na Figura 18 que com uma magnificação de 200000 x, magnificação utilizada pela literatura para encontrar traços de compostos intermetálicos, não foi possível identificar traços desses compostos. Foi possível de observar que o tipo de união dos depósitos foi a e ancoragem mecânica, sem a difusão dos materiais.

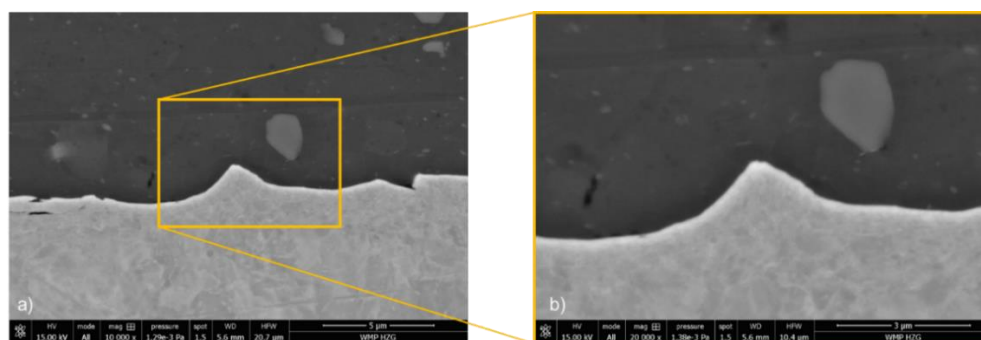


Figura 16. Imagem da investigação para procurar compostos intermetálicos com a) uma visão geral mostrando a interface sem defeitos e em b) o detalhe a interface sem compostos intermetálicos visíveis.

## 4. CONCLUSÕES

Este presente trabalho de conclusão de curso teve como objetivo explorar o processo de FS utilizando pinos de AA6082 em substratos de AISI4140 e S355, fazendo uma análise das

propriedades geométricas, dureza e microscopia e suas relações com a dureza do pino consumível.

Os parâmetros para possível deposição de AA6082 em AISI4140 foram encontrados, fazendo um pequeno ajuste nos parâmetros em S355, especificamente na velocidade rotacional na fase de plastificação, possibilitando assim, novos estudos para, por exemplo, otimizar esses parâmetros para maximizar ou minimizar certas características da deposição.

Para estudo da influência da dureza dos pinos nas características finais das deposições, o modelo de tratamento térmico resultou em 3 grupos de pinos com durezas diferentes. Nas características observadas, não foi encontrada nenhuma relação direta entre a dureza dos pinos e as propriedades finais, porém foram encontradas diferenças entre as deposições feitas com pinos tratados termicamente e as deposições com pinos sem tratamento térmico. Essas diferenças foram observadas quando se tratava de taxa de consumo do pino, eficiência da deposição, espessura da camada depositada e largura de camada sem defeitos.

Em relação à dureza, não foi encontrada relação entre a dureza dos pinos ou relação se eles eram tratados termicamente ou não, mas sim foi encontrado uma relação entre a combinação de material, onde as deposições nos substratos de maior dureza (AISI4140), resultaram em camadas depositadas com dureza média superior. Além disso foi observado que a dureza aumenta à medida que se afasta da interface em ambas as combinações, fato já observado em outros estudos.

No quesito temperatura do processo, não foi verificada grande variação da temperatura do processo, levando como base as medições térmicas feitas pela câmera infravermelho, método com maior confiabilidade utilizado.

Quanto à microestrutura, não foi encontrada uma relação entre a dureza dos pinos de alumínio e tamanho de grão, visto que o tamanho médio de grão se manteve em todas as deposições, isto devido à falta de variação da temperatura de processo e, conseqüentemente, aporte constante de energia. Não foram encontrados compostos intermetálicos.

Para trabalhos futuros, visto que o presente trabalho foi limitado em relação ao tamanho da amostragem de depósitos seria de grande contribuição investigar as relações estudadas com uma amostragem maior, com mais combinações de materiais e mais deposições por combinação. Sendo assim possível de fazer um tratamento estatístico que traga maior confiabilidade aos resultados.

Também se sugere aplicar um estudo de análise dimensional para determinar as relações entre os parâmetros estudados e investigar quais são realmente significativos. Além disso, seria de grande contribuição utilizar métodos e critérios estatísticos nas conclusões dos resultados.

Outra sugestão para investigar as relações entre as deposições de pinos que passaram por tratamento térmico e as que não passaram, seria de realizar vários ensaios utilizando a técnica de *DSC* ou *Differential Scanning Calorimetry* para verificar se no tratamento térmico são formadas ou dissolvidas importantes precipitações que poderiam influenciar nos resultados encontrados.

## 5. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL. **ASTM E112 – 13: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size**. West Conshohocken, PA: ASTM International. p. 28, 2013. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1520/E0112-13R21>

BADHEKA, K.; BADHEKA, V. **Friction Surfacing Of Aluminium on Steel: An Experimental Approach**. *Materials Today: Proceedings* Vol. 4 Iss. 9 (2017) 9937–9941, p. 5, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.297>

GANDRA, J. *et al.* **Friction surfacing—A review**. *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 214 (2014) 1062–1093, p. 33, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.12.008>

KALLIEN, Z.; RATH, L.; ROOS, A.; KLUSEMANN, B. **Investigation of Temperature Evolution and Flash Formation at AA5083 Studs During Friction Surfacing**. *Materials Science Forum*, Vol. 1016, pp 660-665, p. 6, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1016.660>

KALLIEN, Z.; RATH, L.; ROOS, A.; KLUSEMANN, B. **Experimentally established correlation of friction surfacing process temperature and deposit geometry**. *Surface & Coatings Technology*, Vol. 397, p. 7, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126040>

KUMAR, B. V.; REDDY, G. M.; MOHANDAS, T. **Identification of suitable process parameters for friction surfacing of mild steel with AA6063 aluminium alloy**. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* V. 74, pages 433–443, (2014), p. 11, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5964-7>

LI, H.; QIN, W.; GALLOWAY, A.; TOUMPIS, A. **Friction Surfacing of Aluminium Alloy 5083 on DH36 Steel Plate**. *Metals*, Vol 9(4), p. 479, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met9040479>

MACHADO, I. G. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. 1. ed., p. 491, 1996. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/213243>

NEE, A. Y. C.; MEHRDAD, Z. *Solid State Welding Processes in Manufacturing*. In: **Handbook of Manufacturing Engineering and Technology**. [S.l.]: Springer Reference, p. 569-592, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4670-4>

OSTEN, J.; MILKEREIT, B.; SCHICK, C.; KESSLER, O. **Dissolution and Precipitation Behaviour during Continuous Heating of Al–Mg–Si Alloys in a Wide Range of Heating Rates**. *Materials* 2015, 8, 2830-2848, p. 19, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma8052830>

ROOS, A. *et al.* **Friction surfacing of aluminum to steel: Influence of different substrate**. *Materials & Design* 235, p. 12, November 2023. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112390>

SAHOO, D. K.; CHARI, A. N.; REDDY, A. S. **Optimization & characterization of friction surfaced coatings of AA6063 aluminium alloy over AISI316 stainless steel substrate.**

Materials Today: Proceedings Vol. 23, Part 3, 2020, Pages 565-572, p. 9, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.410>

SAHOO, D. K.; MOHANTY, B S.; ECHEMPATTI, R. **Computation of roughness at substrate coating interface on deposition of aluminium over medium carbon steel by friction surfacing.** Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures Vol. 15, No. 2, April - June 2020, p. 513 - 526, p. 14, 2020.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.15251/DJNB.2020.152.513>

TROYSI, F. D; BRITO, P. P; **Development and characterization of an iron aluminide coating on mild steel substrate obtained by friction surfacing and heat treatment.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Vol 111, p. 2569 – 2576, 2020, p. 8, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06310-w>



## 6. APÊNDICE A – Fotos das Deposições

### 6.1. Deposições em AISI4140



Figura A-1. Deposição de AA6082 com tratamento térmico de recozimento em substrato de AISI4140.



Figura A-2. Deposição de AA6082 sem tratamento térmico em substrato de AISI4140.



Figura A-3. Deposição de AA6082 com tratamento térmico de envelhecimento artificial em substrato de AISI4140.

## 6.2. Deposições em S355



Figura A-4. Deposição de AA6082 com tratamento térmico de recozimento em substrato de S355.

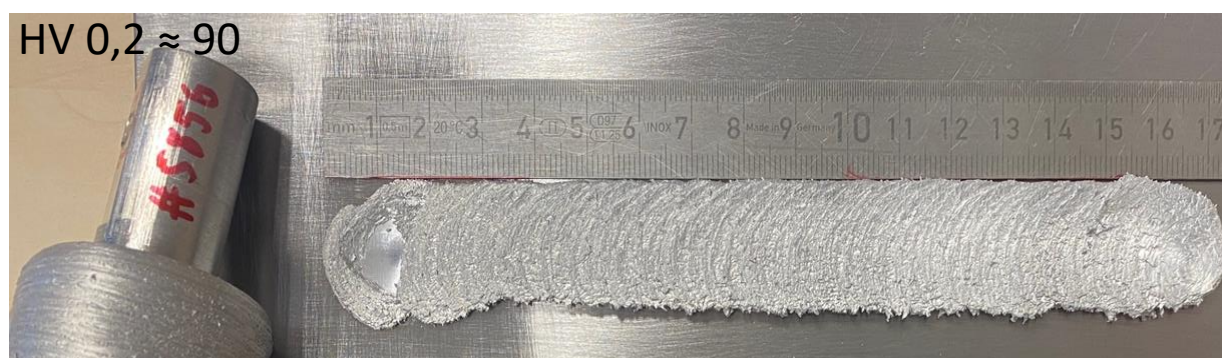


Figura A-5. Deposição de AA6082 sem tratamento térmico em substrato de S355.

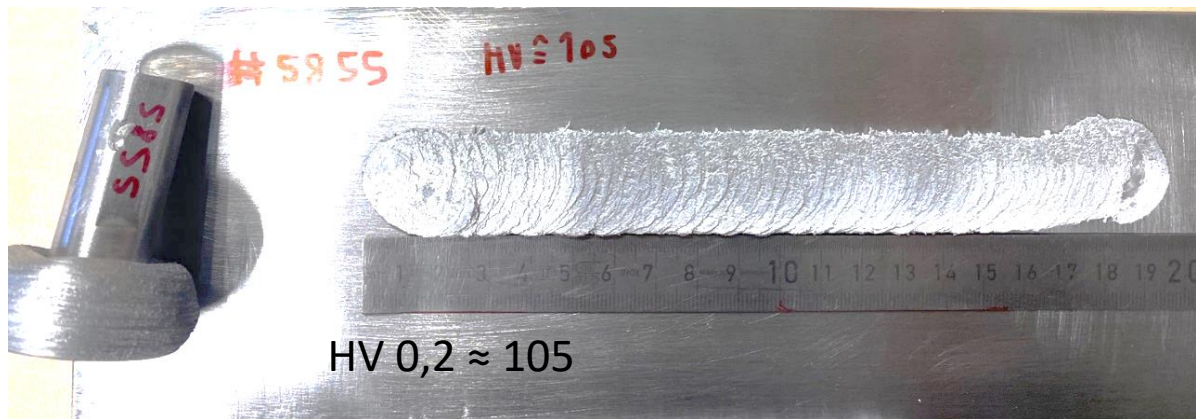


Figura A-6. Deposição de AA6082 com tratamento térmico de envelhecimento artificial em substrato de S355.