

**ALAN BORGES OLIVEIRA**

**ESTUDO DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO SUPERFICIAL  
POR FRICÇÃO COM RECURSOS CONSUMÍVEIS COMO  
TÉCNICA DE MANUFATURA ADITIVA**

São Paulo  
2022

**ALAN BORGES OLIVEIRA**

**ESTUDO DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO SUPERFICIAL  
POR FRICÇÃO COM RECURSOS CONSUMÍVEIS COMO  
TÉCNICA DE MANUFATURA ADITIVA**

Trabalho de Formatura em Engenharia Metalúrgica do curso de graduação do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Orientador:

Prof. Dr. Eduardo Franco de Monlevade

São Paulo  
2022

Eu, Alan Borges Oliveira, autorizo a reprodução total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Eu, Eduardo Franco de Monlevade, responsável por este trabalho, autorizo a publicação na biblioteca da USP desta versão desta obra para fins de divulgação científica.

*Eduardo Franco de Monlevade*

---

Prof. Dr. Eduardo Franco de Monlevade

#### Catálogo-na-publicação

Oliveira, Alan Borges

Estudo do processo de deposição superficial por fricção com recursos consumíveis como técnica de manufatura aditiva / A. B. Oliveira -- São Paulo, 2022.

43 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Deposição superficial por fricção 2.Revestimento 3.Processamento em estado sólido 4.Parâmetros de processo 5.Manufatura aditiva I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

Dedico este trabalho à minha mãe, Elis Regina, meu pai, Anivaldo, meu orientador, Professor Monlevade, e todas as pessoas que me acolheram na Escola Politécnica. Agradecimentos especiais à Amélia, da Seção de Alunos do Ciclo Básico, e às pessoas magníficas que conheci no Centro Moraes Rêgo.

# AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de, primeiramente, agradecer aos meus pais por sempre terem colocado minha educação acima de tudo e sacrificado tanto por mim. A Elis Regina e o Anivaldo foram exemplos e desde cedo me incentivaram muito a estudar. Mesmo sendo pessoas que não tiveram acesso a estudo e muito menos ao ensino superior, nunca deixaram de confiar em mim e me motivar. O meu maior agradecimento a vocês. Por toda a eternidade eu serei grato.

Eu agradeço aos meus "segundos pais", Nelson e Bia, que junto com toda a família sempre cuidaram de mim, me apoiaram e ficaram ao meu lado. Também quero agradecer a minha sobrinha, Maria Júlia, e meus irmãos, por todo o amor e carinho. Aqui também consta um agradecimento aos amigos de vida e irmãos: Guilherme, Caio, Priscila e Pamela. Vocês me ajudaram muito e eu agradeço por estarem ao meu lado há mais de uma década.

Dentro da Escola Politécnica eu pude fazer amizades muito valiosas e conhecer pessoas fantásticas, pessoas que levarei para a vida. Os meus mais profundos agradecimentos aos amigos e amigas que fiz dentro do Centro Moraes Rêgo. Em especial, agradecimentos ao Kadota, Benito, Marsola, Malu, Renan, Paulo, Dinei, Caio, Camila, Bia, Mariana, Pestana. Outros companheiros que me motivaram muito foram a Visa, Bella, Landi, Renata, Sher, Sara, Júlia, Jun, Fernando, Felipe e tantos outros que não tenho como mencionar em um único documento. Muito obrigado.

Outras influências na Poli que me ajudaram muito e me deram forças em inúmeros momentos merecem meu agradecimento. Meu agradecimento profundo à Isabela da Fonseca Rosa, Paula Daniela, Nathália KT, Virgínia, Luísa, Raissa, Thais, Messias, Matheus Tavares e tantas outras pessoas. Mesmo os muitos não mencionados aqui serão sempre levados comigo dentro do meu coração.

Meus agradecimentos aos professores que mais foram humanos, empáticos e me deram grandes ensinamentos dentro e fora de sala de aula. Estes agradecimentos vão para o professor Monlevade e o professor César, que mais me influenciaram na rotina dentro do PMT e me deram muita força para continuar lutando. Também agradeço a todos os professores que participaram do meu processo de aprendizado dentro e fora da universidade.

Agradeço aos funcionários da Poli e, em especial, à Amélia, que no meu momento de dificuldade dentro da Poli, e de desamparo, foi uma das pessoas que mais me ajudou. Você foi como uma mãe dentro da Poli e eu tenho muito a agradecer.

Foram momentos muito difíceis e complicados passados dentro da Poli. O sofrimento psicológico, trancamento, momentos de solidão e de incertezas. O amor e a ajuda das pessoas me deu forças para continuar acreditando que o sonho era possível.

Todos, cedo ou tarde, têm seu momento de brilhar.

## RESUMO

O processo de deposição superficial por fricção é uma técnica de manufatura aditiva que, em metalurgia, é responsável por revestimentos e reparos de ligas metálicas utilizando processos no estado sólido. O objetivo do presente trabalho é realizar uma revisão bibliográfica que traga compreensão sobre o processo e possibilite observar a viabilidade para aplicações industriais. De acordo com as análises, se faz necessária a ampliação dos estudos e avanços na acessibilidade tecnológica de forma a possibilitar aplicações industriais mais amplas, uma vez que o processo é muito caro e demanda precisão elevada.

**Palavras-Chave** – Deposição superficial por fricção, Revestimento, Processamento em estado sólido, Parâmetros de processo, Manufatura aditiva.

# ABSTRACT

The friction surfacing process is an additive manufacturing technique that, in metallurgy, is responsible for coating and repairing metal alloys using solid state processes. The aim of the present study is to perform a bibliographic review that brings understanding over the process and allows an observation about the industrial application viability. According to the analyses, it is necessary to increase studies and enhance the technology accessibility in order to enable further industrial applications, since the process is too expensive and demands high precision.

**Keywords** – Friction surfacing, Coating, Solid state processing, Process parameters, Additive manufacturing.

# LISTA DE FIGURAS

1.1	Primeira concepção patenteada da composição envolvida no processo de DSF. . . . .	13
1.2	Determinação simplificada dos parâmetros de processo relacionados ao tempo de contato entre as ligas. Os pontos A e B representam o período no qual a deposição irá ocorrer, enquanto esquerda e direita determinam, respectivamente, os períodos nos quais o material é colocado e retirado de contato. .	13
3.1	Processo de DSF. Nos detalhes, a) Estágio inicial; b) Fase de aquecimento e adesão; c) Deposição superficial. . . . .	17
3.2	Detalhe dos parâmetros envolvidos no processo de DSF. . . . .	17
3.3	Aspecto viscoplástico do componente consumível após um tempo de fricção aplicada. . . . .	18
3.4	Diferentes testes realizados e a relação com a deposição viscoelástica e a formação da região de rebarba. Temos mudanças na velocidade de rotação (rpm), tensão aplicada ao processo de fricção (MPa) e diâmetro da liga consumível (mm). . . . .	19
3.5	Comparação da deposição obtida com a técnica de DSF para diferentes valores de velocidade de rotação. Da esquerda para a direita, temos: 3,5; 7,5 e 11,5 mm/s. Em (a) temos uma visão superior e, em (b), uma visão lateral do processo. . . . .	20
3.6	A fresadora é a máquina normalmente responsável pelas aplicações dos processos de DSF. Na imagem, há uma associação com um dinamômetro e um aparato para coleta de dados. . . . .	21
3.7	Gradiente de temperatura no elemento consumível durante o processo de DSF. A temperatura é dada em °C. . . . .	22
3.8	Gradiente de temperatura do depósito aplicado no metal base durante o processo de DSF. A temperatura é dada em °C. . . . .	23
3.9	Gradiente de deformação plástica do depósito aplicado no metal base durante o processo de DSF. A deformação é dada em mm/mm. . . . .	23



3.10 Microscopia realizada na região de aplicação do processo de DSF. À esquerda, a estrutura central da deposição. À direita, uma das bordas nas quais a deposição não foi realizada de forma completa. A superfície está polida e submetida a um aumento de 50x. . . . .	24
3.11 Representação macroscópica das regiões envolvidas no processo de DSF. De (a) até (d) temos o metal consumível, (e) é a zona de deposição e (f) é o metal base. Também temos, à direita, um acompanhamento da evolução da dureza durante as fases. . . . .	25
3.12 Análise microestrutural das diferentes regiões durante o processo de DSF. (a) Metal consumível, (b) Zona influenciada apenas pelo aspecto térmico, (c) Zona influenciada por aspectos térmicos e mecânicos do processo, (d) Estrutura completamente recristalizada, (e) Microestrutura da região de deposição e (f) Região do metal base afetada pelos fenômenos térmicos. . . .	26
3.13 Relação de força axial, taxa de deposição e velocidade de rotação na integridade do revestimento. O metal base é a liga de alumínio 5083, enquanto são aplicados revestimentos com aço inoxidável e aço macio. . . . .	27
3.14 Microestruturas da deposição de aço ferramenta H13 em ligas de aço com baixo carbono. As alterações nas velocidades de deposição evidenciam a presença, ou não, de lacunas que acabam influenciando na aderência final. . . . .	28
3.15 Processo de MEV aplicado à amostra submetida a velocidade de deposição de 4,4 m/s da Figura X. As regiões (a) e (b) são vistas com maior detalhamento. A adesão é mais efetiva devido ao ancoramento ocorrido. . . . .	29
3.16 Mecanismo idealizado para reparo de trilhos de trem danificados. . . . .	30
4.1 Vista lateral da máquina utilizada no teste. [Fonte: De autoria própria.] . . .	31
4.2 Vista frontal da máquina utilizada no teste. [Fonte: De autoria própria.] . . .	32
4.3 Elemento consumível e apoios utilizados para garantir que o metal base permaneça estático. [Fonte: De autoria própria.] . . . . .	33
4.4 Início do teste a partir da movimentação da máquina para estabelecer contato entre as ligas. [Fonte: De autoria própria.] . . . . .	34
4.5 No momento de contato, é possível perceber desalinhamento e oscilações no elemento consumível. [Fonte: De autoria própria.] . . . . .	35

4.6	Outra vista do desalinhamento no elemento consumível. [Fonte: De autoria própria.] . . . . .	35
4.7	Segunda tentativa para o teste. O elemento consumível é retirado, a máquina é regulada novamente, mas o desalinhamento continua presente. [Fonte: De autoria própria.] . . . . .	36
4.8	Aspecto do metal base após o teste. [Fonte: De autoria própria.] . . . . .	36
4.9	Característica macroscópica da liga consumível após o teste. [Fonte: De autoria própria.] . . . . .	37
4.10	Aspecto estrutural relacionado ao processo de torção que o elemento acabou sofrendo no teste. [Fonte: De autoria própria.] . . . . .	37
4.11	Marcas no metal base mostram o processo de tentativa de deposição em pontos distintos. [Fonte: De autoria própria.] . . . . .	38
4.12	Formação inicial da região de rebarba. É o indicativo do processo de DSF. [Fonte: De autoria própria.] . . . . .	39
4.13	Vista expandida mostrando a estrutura mais robusta do fresador. [Fonte: De autoria própria.] . . . . .	40

## LISTA DE TABELAS

3.1	Composição química das ligas utilizadas no estudo. . . . .	24
-----	--	----

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>Revisão bibliográfica</b>	<b>15</b>
3.1	Origem . . . . .	15
3.2	Funcionamento mecânico . . . . .	16
3.3	Fenômenos térmicos . . . . .	19
3.4	Microestrutura resultante . . . . .	22
3.5	Principais ligas utilizadas . . . . .	25
3.6	Principais usos e aplicações . . . . .	27
3.7	Aspectos ambientais do processo . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Observações finais</b>	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>41</b>
	<b>Referências</b>	<b>42</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O processo de deposição superficial por fricção com recursos consumíveis (que chamaremos de DSF no presente trabalho para facilitar a menção) é uma técnica de manufatura aditiva termomecânica que se aplica a elementos no estado sólido. [1]

Este foi elaborado pela primeira vez na década de 40 por Klopstock e Neelands, que também patentearam o mecanismo desenvolvido. [2] Entretanto, somente nos anos 80 foi estudado com maior aprofundamento. Os estudos posteriores visaram, principalmente, entender a possibilidade de aplicação em escala industrial. [3]

A técnica do DSF funciona com base na deposição de um metal consumível por meio de fricção sobre o metal base. Uma máquina, ao passo que aplica rotação ao metal consumível, também aplica uma força contra o metal base. [1] A configuração básica do sistema pode ser vista por meio da Figura 1.1.

Conforme a taxa de deposição atinge níveis desejados, há um deslocamento transversal para contemplar o restante da superfície. Naturalmente há um período no qual se estabelece o contato e, após finalizado o processo, é interrompida a interação. [1] Uma demonstração básica do controle dos parâmetros em função do tempo de processo pode ser observada por meio da Figura 1.2.

Tudo ocorre por meio do calor originado do processo mecânico aplicado, uma vez que este permite a deposição superficial com base na deformação plástica do metal consumível. A liga consumível, à medida que o processo avança, começa a formar uma região de rebarba com o material não depositado. [3] Além disso, o produto resultante do processo apresenta um aspecto microestrutural muito interessante, já que são formados grãos refinados, com boa difusão em relação ao metal base. [5]

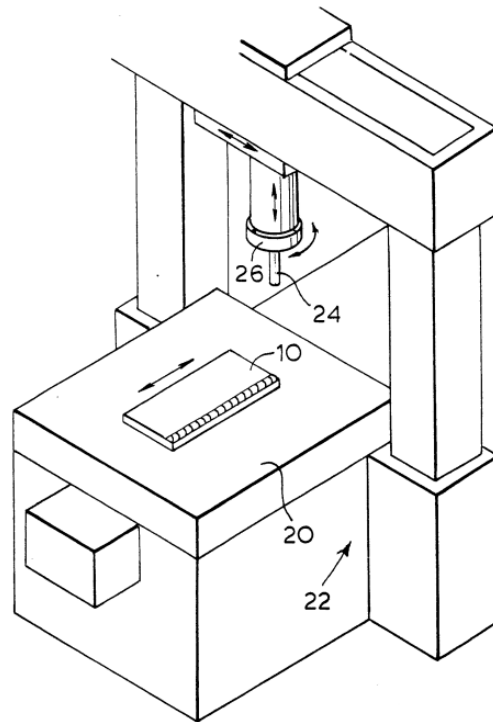


Figura 1.1: Primeira concepção patenteada da composição envolvida no processo de DSF.  
[4]

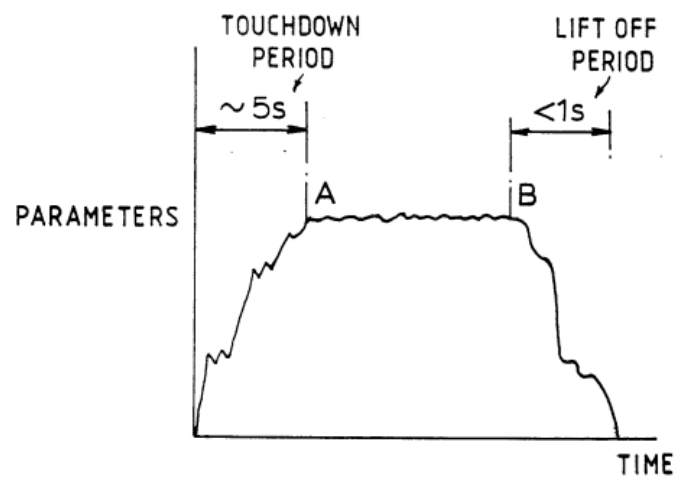


Figura 1.2: Determinação simplificada dos parâmetros de processo relacionados ao tempo de contato entre as ligas. Os pontos A e B representam o período no qual a deposição irá ocorrer, enquanto esquerda e direita determinam, respectivamente, os períodos nos quais o material é colocado e retirado de contato.

[4]

## 2 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é realizar uma revisão bibliográfica sobre o processo de deposição superficial por fricção com recursos consumíveis. O estudo possibilitará a compreensão dos fenômenos físicos, térmicos e microestruturais envolvidos, além de apresentar o grau de viabilidade como método aplicado em escala industrial. Ao final, é desejada uma visão a respeito da aplicação prática da tecnologia e, caso existam, quais barreiras ainda devem ser superadas para que seja uma técnica mais acessível.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Origem

O processo de DSF foi desenvolvido e patenteado em 17 de outubro de 1941 por Klopstock e Neelands. As aplicações do método são relacionadas, principalmente, aos processos de soldagem e junção de metais, sendo estes baseados na geração de calor, modificação física das ligas metálicas e adesão dos metais em um produto composto resultante da técnica. [2]

O método, em sua concepção, abrange tanto o processo de soldagem, quanto o de rebitagem (o foco central do presente trabalho será o processo DSF, como já mencionado). O funcionamento básico do processo se sustenta na geração de calor proveniente do processo de fricção aplicado na liga metálica. A rotação faz com que o tenhamos adesão da liga, ao passo que ocorre movimentação para que a área de interesse seja contemplada. [2] O funcionamento detalhado do processo, após os diversos desenvolvimentos provenientes de estudos posteriores, será descrito em itens posteriores.

Os primeiros estudos direcionados ao processo de DSF apareceram no ano de 1959, sendo estes relatórios originados a partir do processo de soldagem por fricção. [6] Entretanto, o interesse comercial no processo de manufatura aditiva só surgiu na década de 80 [7], sendo comercializado para clientes na década de 90. O primeiro processo comercializável foi o FRITEC, que era baseado no uso de um maquinário de elevado custo e necessidade de altas tensões aplicadas. [6]

Na década de 90, o processo de DSF, tal como será abordado no presente trabalho, foi patenteado por Bedford e Richards. O método será abordado com maior detalhamento em seguida, mas a patente o define como ferramenta para obtenção de um produto com superfície contendo níveis de dureza elevados. O documento ilustra brevemente o mecanismo utilizado e dá recomendações a respeito do período no qual um material deve estar em contato com o outro. [4]



Conforme novos estudos foram conduzidos, se buscou minimizar o custo operacional do processo visando a possibilidade de aplicações mais amplas. O uso de equipamentos mais simples, baratos e associados a tecnologias mais robustas é essencial para que as técnicas possam ser aplicadas tanto na produção, quanto na reparação dos materiais (independentemente de suas localizações geográficas ou aplicações, por exemplo). [6]

Em termos de ligas metálicas utilizadas, os estudos iniciais tiveram grande foco em ligas de ferro e cromo. Em termos de deposições de camadas visando aumento da resistência a corrosão, o alumínio foi um dos objetos de estudo principais. Os focos mais recentes dos estudos visam identificar a possibilidade de uso da técnica de manufatura em diferentes materiais, como se dão as respostas em cada um e qual a possibilidade de aplicação de múltiplas camadas de deposição em um processo. [6]

## 3.2 Funcionamento mecânico

O processo de DSF opera com base nos processos de rotação, carregamento axial e deslocamento do plano superficial no qual está sendo aplicada a deposição. Para que a compreensão do procedimento seja realizada com maior acurácia, vamos considerar uma composição com uma barra consumível de uma liga metálica determinada (como uma liga de alumínio, por exemplo) e uma placa base na qual será aplicado o depósito proveniente do processo (também pode ser uma liga de alumínio, mas com composição distinta).

A barra consumível receberá a aplicação de uma força rotativa em relação ao seu eixo central, ao passo de um carregamento axial determinado será aplicado na direção normal à seção transversal da barra. A placa base inicialmente se encontrará em estado estacionário, sendo posteriormente submetida a um deslocamento horizontal. É possível observar o fenômeno descrito na Figura 3.1.

Como visto, o processo pode ser dividido em 3 etapas, sendo elas: estágio inicial, fase de aquecimento e adesão e, por fim, processo de deposição superficial. A primeira etapa se baseia na adesão da superfície da barra consumível ao plano, sendo aplicado o carregamento e realizada a rotação. Após um certo período, a barra consumível atinge uma temperatura elevada, altera seu estado físico e começa a se aderir ao plano base (segunda etapa). Quando esse momento chega, o plano é deslocado de forma a iniciar a adesão em outras partes da superfície do plano base (terceira etapa). [8]

Os parâmetros de processo que podem ser alterados, em termos do material consumível, são a velocidade de rotação e a força aplicada. Além disso, a velocidade de

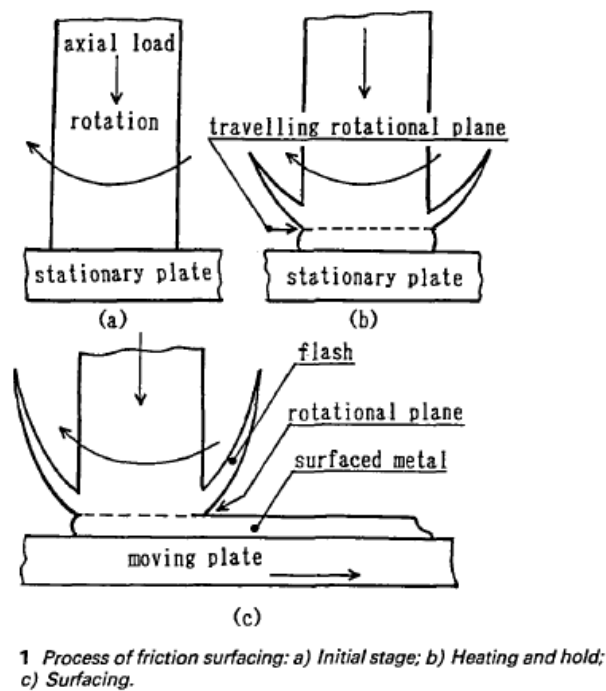


Figura 3.1: Processo de DSF. Nos detalhes, a) Estágio inicial; b) Fase de aquecimento e adesão; c) Deposição superficial.

[8]

deslocamento do material base também é importante na observação de deposições com características distintas. [9] A influência dos parâmetros pode ser vista com maior detalhamento na Figura 3.2, que também mostra a característica da camada depositada.

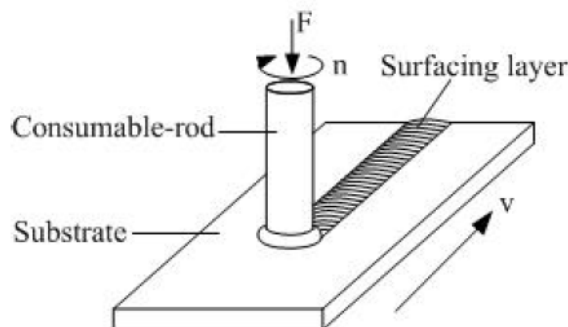


Figura 3.2: Detalhe dos parâmetros envolvidos no processo de DSF.

[9]

Quando é aplicado um foco na região aquecida, é possível perceber que o material consumível começa a adquirir um aspecto viscoplástico à medida que a fricção é aplicada. No momento em que esse fenômeno físico ocorre, é iniciada a deposição da camada no material base. [9] Essa etapa inicial do processo pode ser vista por meio da Figura 3.3.

Ao passo que ocorre a deposição do material e o deslocamento em relação à base, é

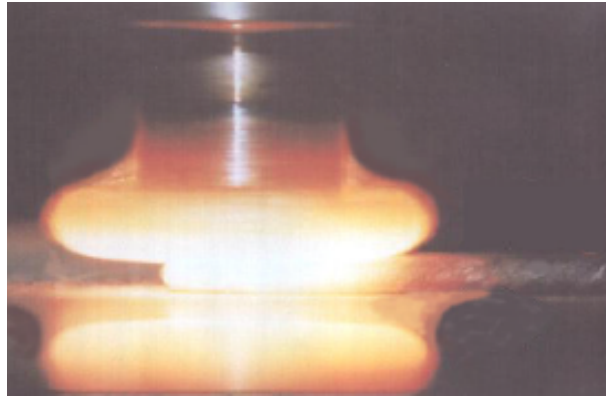


Figura 3.3: Aspecto viscoplástico do componente consumível após um tempo de fricção aplicada.

[9]

possível perceber a formação de uma região de rebarba no metal consumível. Em testes realizados, foi constatado que as velocidades de rotação aplicadas influenciam diretamente na formação desta região, ao passo que o diâmetro da barra consumível influencia na espessura que gera essa estrutura e, por fim, a tensão aplicada reverbera na espessura do revestimento aplicado ao metal base. [8] A compreensão da formação dessa estrutura é importantíssima para entendermos a forma como o material se deposita. Resultados experimentais com diferentes parâmetros aplicados podem ser vistos por meio da Figura 3.4.

Um detalhe importante é que o metal que, de fato, é depositado na estrutura base é o material proveniente da região central da liga consumível. Isso significa que, durante o processo de DSF, a parcela periférica da barra consumível se torna a estrutura de rebarba, enquanto a região central, adquirindo aspecto viscoplástico, é depositada. [8] Além disso, a espessura do depósito formado pode ser alterada com base na velocidade de rotação aplicada [8], conforme observado na Figura 3.5.

A formação da região de rebarba é um ponto importante de otimização, uma vez que implica em material não aplicado durante o processo. A taxa de conversão de material em rebarba, utilizando o método convencional com uma máquina fresadora acima da chapa, pode chegar a 60% do material consumível. Apesar de não ser um dado alarmante devido à natureza reutilizável das ligas metálicas, acaba implicando em aumento dos custos operacionais e, portanto, é um aspecto que deve ser levado em conta. [10]

Em relação à máquina utilizada no processo, em geral é utilizada uma fresadora que imprime força e velocidade de rotação em relação ao corpo colocado abaixo. Esta pode ser associada a outras tecnologias visando a aquisição de uma amplitude maior de dados

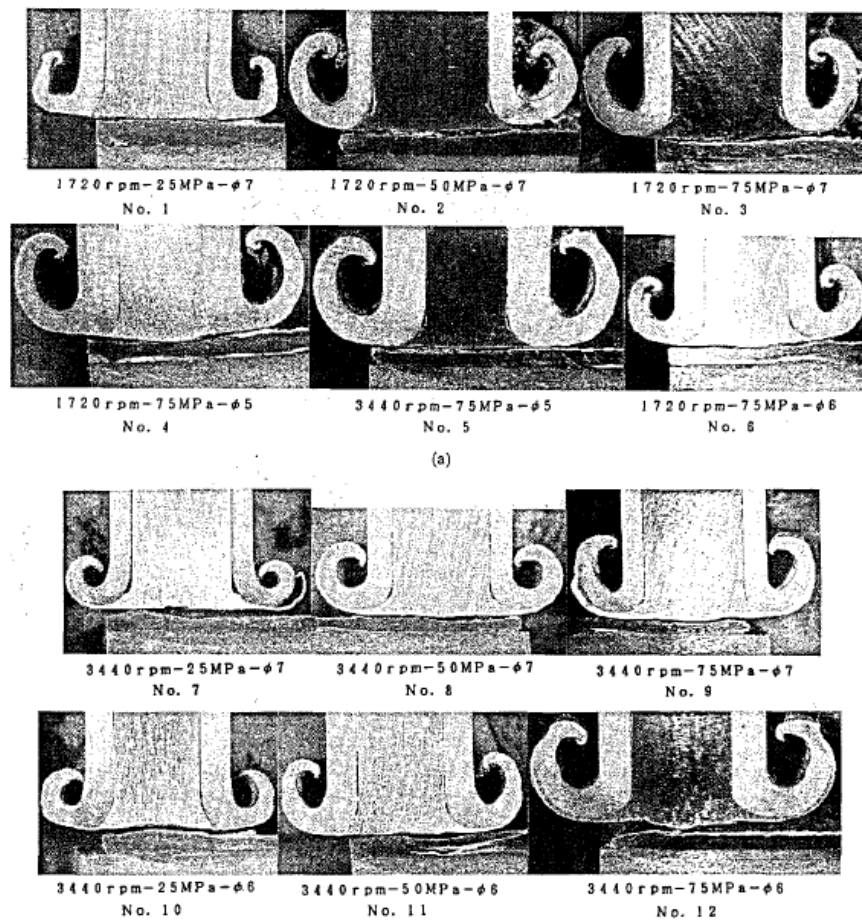


Figura 3.4: Diferentes testes realizados e a relação com a deposição viscoelástica e a formação da região de rebarba. Temos mudanças na velocidade de rotação (rpm), tensão aplicada ao processo de fricção (MPa) e diâmetro da liga consumível (mm).

[8]

[10], como ilustrado por meio da Figura 3.6. As análises experimentais, abordadas em um tópico posterior, mostram que aspectos relacionados à calibragem e qualidade da máquina podem interferir nos resultados e, até mesmo, impossibilitar a deposição correta do material consumível.

### 3.3 Fenômenos térmicos

Os processos térmicos que ocorrem na técnica de DSF são muito importantes para que possamos entender como a adesão ocorre e a influência no aspecto microestrutural no final. Por se tratar de um fenômeno que envolve atrito, elevada tensão aplicada, altas rotações e envolvimento de duas espécies sólidas, há uma elevada geração de calor visando a mudança de estado físico da matéria.

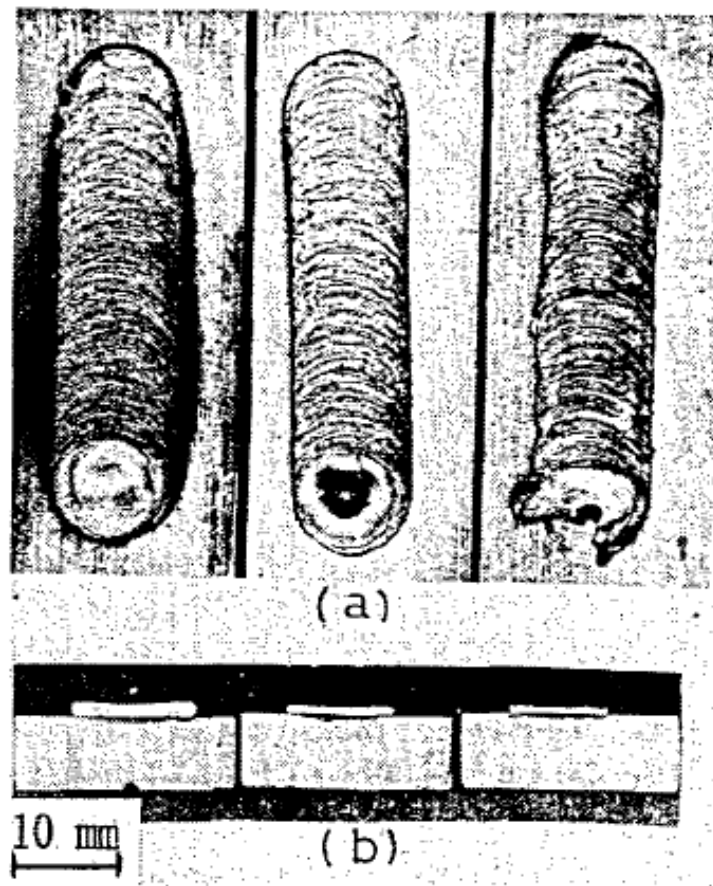


Figura 3.5: Comparação da deposição obtida com a técnica de DSF para diferentes valores de velocidade de rotação. Da esquerda para a direita, temos: 3,5; 7,5 e 11,5 mm/s. Em (a) temos uma visão superior e, em (b), uma visão lateral do processo.

[8]

A condução térmica, na análise da liga consumível, se dá através de condução proveniente do processo de fricção aplicado. Ocorre a geração de um gradiente de temperatura que parte da região de contato entre as ligas (onde há foco do processo de fricção) e o calor vai progressivamente diminuindo à medida que se distancia deste ponto. [11] A transmissão de calor no componente consumível pode ser vista por meio da Figura 3.7. É interessante observar que ao passo que a região quente com característica viscoelástica é depositada no metal base, as regiões mais frias auxiliam no processo de deposição por serem sólidas e permitirem a propagação das forças. [11]

Já a Figura 3.8 mostra o gradiente de temperatura na superfície do metal base. É possível perceber que a concentração de calor se dá na região de avanço e na região de saída do processo. O calor diminui à medida que a tensão associada à deformação plástica também diminui. Isso significa que, ao passo que ocorre a fixação da camada superficial, temos uma redução progressiva em termos térmicos. Além disso, todos os fenômenos que

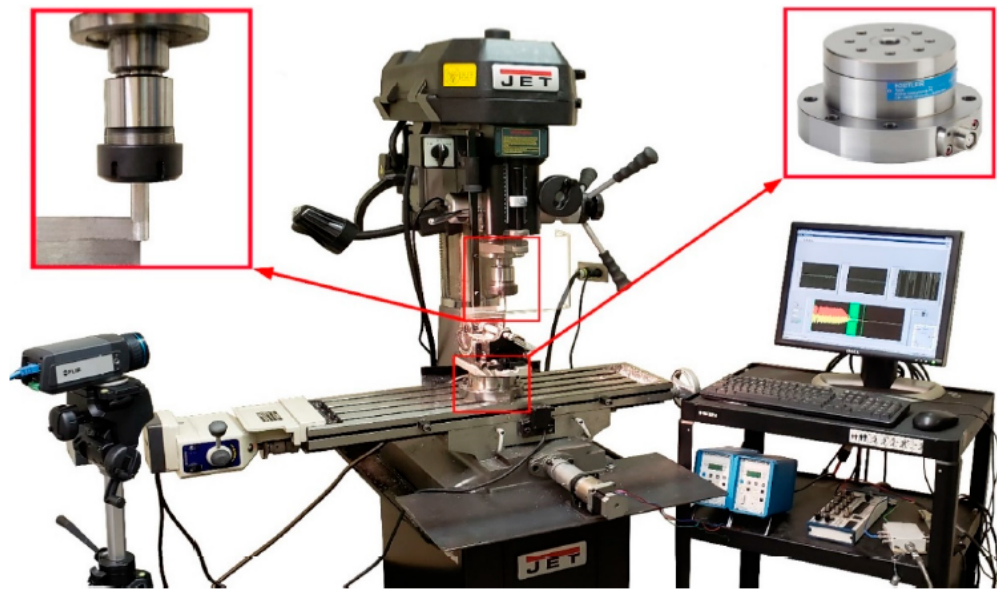


Figura 3.6: A fresadora é a máquina normalmente responsável pelas aplicações dos processos de DSF. Na imagem, há uma associação com um dinamômetro e um aparato para coleta de dados.

[10]

ocorrem na região de avanço da chapa base são mais intensos do que na saída. [11]

Conforme mostra a Figura 3.9, a região central do revestimento formado no metal base tende a manter propriedades térmicas e plásticas mais amenas. Isso se deve ao próprio processo de fricção aplicado, uma vez que este se intensifica nas regiões periféricas. [11] A geração das Figuras 3.7, 3.8 e 3.9 foi realizada com base em um modelo de simulação tridimensional por elementos finitos, proveniente do programa ABAQUS, que consegue apresentar os comportamentos térmicos e mecânicos do processo. [11]

As mudanças em parâmetros do processo que podem elevar a temperatura resultante são a força axial aplicada e a velocidade de rotação impressa. [10] É possível realizar simulações que indicarão a temperatura limite para o processo. Dessa forma, conseguimos trabalhar com menores exigências operacionais e temos economia de recursos, ao passo que o processo se torna mais otimizado. [12]

Um exemplo de controle de temperatura que pode influenciar positivamente na adesão da camada de revestimento é o aumento da área de contato entre o componente consumível e a base. Portanto, para diâmetros maiores de ligar consumíveis, teremos maior potencial de elevação de temperatura e, por consequência, conseguiremos um resultado final mais satisfatório com pequenas alterações no processo [12]

A elevação da temperatura também pode resultar em deposições superficiais com es-

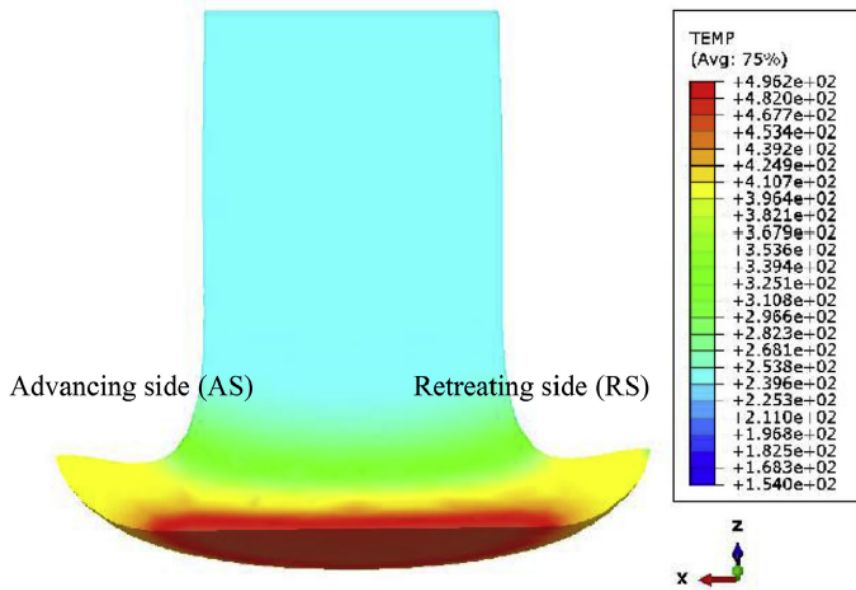


Figura 3.7: Gradiente de temperatura no elemento consumível durante o processo de DSF. A temperatura é dada em  $^{\circ}\text{C}$ .

[11]

pessuras menores. Ou seja, a manipulação do fluxo de calor no processo faz com que possamos determinar a espessura esperada para o processo realizado. [10]

### 3.4 Microestrutura resultante

Os aspectos microestruturais de ligas submetidas ao processo de DSF são muito importantes para a compreensão das influências dos parâmetros de processo. Alterações em algumas variáveis podem determinar propriedades físicas diferentes, como a dureza do depósito formado, além de comprometerem diretamente na eficácia da adesão do revestimento no produto finalizado. [13]

O conjunto de elementos mecânicos e térmicos que ocorrem no processo, conforme detalhados nos itens anteriores, faz com que os grãos sofram recristalização e se tornem mais finos. [13] Essa nova conformação microestrutural é desejada no processo de DSF, uma vez que a estrutura com grãos mais finos confere maior abrasividade e melhor resistência a processos corrosivos. [14] Dessa forma, conseguimos melhores propriedades de resistência a desgaste e evitamos quaisquer falhas provenientes de efeitos corrosivos.

A deposição do revestimento por meio do processo de DSF não irá compreender toda a extensão da área aplicada, uma vez que as extremidades da estrutura acabam por ter pontos sem adesão entre os materiais. [15] Esse aspecto da deposição pode ser visto com

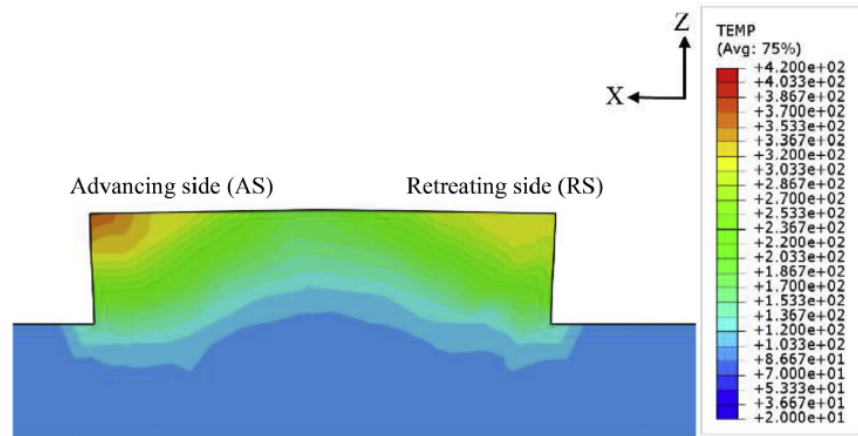


Figura 3.8: Gradiente de temperatura do depósito aplicado no metal base durante o processo de DSF. A temperatura é dada em  $^{\circ}\text{C}$ .

[11]

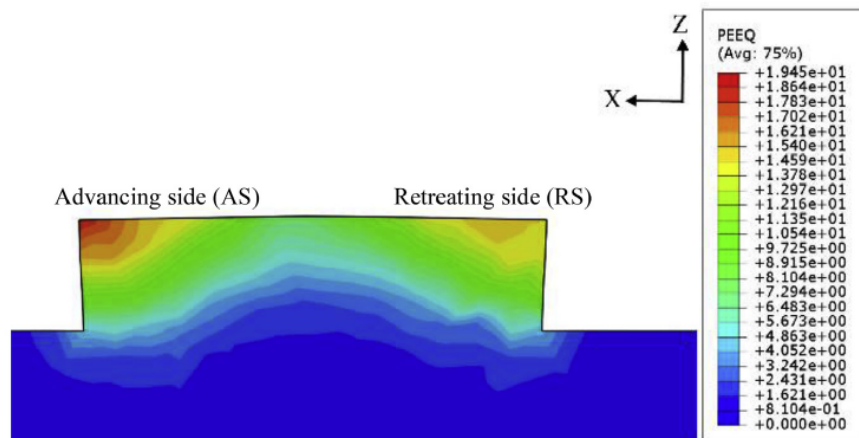


Figura 3.9: Gradiente de deformação plástica do depósito aplicado no metal base durante o processo de DSF. A deformação é dada em mm/mm.

[11]

maiores detalhes por meio da Figura 3.10.

As diferenças microestruturais mencionadas anteriormente (refino de grão) podem ser vistas por meio da Figura 3.10. Além disso, na Figura 3.11, é possível perceber a estrutura com o metal consumível já utilizado, a formação da região de rebarba, a camada depositada e o metal base. A correlação entre a estrutura macroscópica e microscópica se dá por meio das letras (a) a (f).

Os parâmetros utilizados na análise anterior foram uma força axial de 5kN, velocidade de rotação de 2500 rpm e velocidade de avanço do metal base de 7,5 mm/s. A promoção da difusão no material faz com que a microestrutura do aço (cuja composição, tanto do metal consumível, quanto do material base, podem ser vistas por meio da Tabela 1) tenha



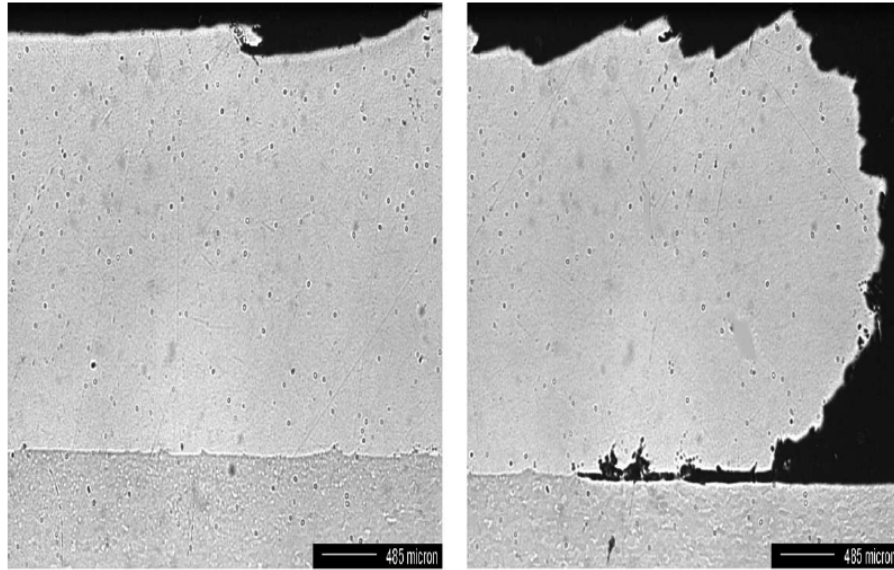


Figura 3.10: Microscopia realizada na região de aplicação do processo de DSF. À esquerda, a estrutura central da deposição. À direita, uma das bordas nas quais a deposição não foi realizada de forma completa. A superfície está polida e submetida a um aumento de 50x. [15]

alterações significativas. [13]

Elemento (%massa)	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
Metal Consumível	0,22	0,70	0,20	0,02	0,06	0,20	0,01	0,40
Metal Base	0,20	0,70	0,20	0,07	0,06	0,06	0,03	0,90

Tabela 3.1: Composição química das ligas utilizadas no estudo.

Conforme a Figura 3.12, na região do material consumível temos a presença de  $\alpha$ -ferrita e perlita (ambas com aspecto alongado proveniente do processo de extrusão gerador da barra), sendo que a perlita passa por um processo de esferoidização conforme o fenômeno térmico é aplicado ao material. A partir do momento em que a deposição ocorre e os aspectos termomecânicos entram em consideração, temos a recristalização da estrutura e a formação de austenita. [13]

É notável que a recristalização faz com que o revestimento tenha dureza muito mais elevada do que em relação ao metal consumível. Por fim, para explicar como a adesão entre os materiais se dá, é necessário compreender o processo de difusão que ocorre a partir da elevação da temperatura. Como o processo de DSF atinge temperaturas próximas à temperatura de fusão do metal consumível, o material viscoplástico (associado ao processo de deformação mecânica) pode comprometer a estrutura das camadas de óxido presentes na superfície do metal base. Esse fenômeno faz com que ocorra uma interação direta entre os metais, permitindo que a junção metálica ocorra com eficiência. [13]

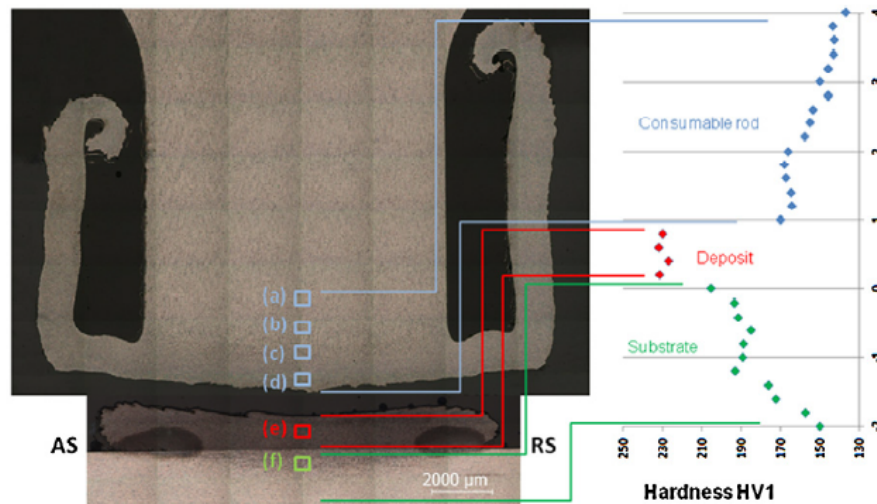


Figura 3.11: Representação macroscópica das regiões envolvidas no processo de DSF. De (a) até (d) temos o metal consumível, (e) é a zona de deposição e (f) é o metal base. Também temos, à direita, um acompanhamento da evolução da dureza durante as fases. [13]

### 3.5 Principais ligas utilizadas

Para tratar das ligas metálicas utilizadas no processo de DSF, é necessário separar o que está relacionado ao metal base e o que está relacionado ao material depositado (ou seja, o material consumível). Em geral, o material consumível terá um foco por ser o alvo da deposição das propriedades aditivas. Além disso, a relação entre cada liga base com o material de revestimento terá seus parâmetros e pontos específicos.

Em termos de materiais utilizados como base para a aplicação do revestimento, podemos mencionar como exemplos: aços ferramenta, ligas de níquel-cromo, ligas de alumínio, ligas de titânio, aços inoxidáveis e aços macios. Dependendo dos parâmetros operacionais e material base, podem ocorrer aderências com taxas de eficiência distintas. Esses aspectos são importantes para a projeção das variáveis que devem ser utilizadas para uma aplicação industrial efetiva. [16]

Já abordando materiais utilizados como base para a deposição superficial, é possível destacar como exemplos: aços macios, ligas de alumínio, aços de baixo carbono e aços ferramenta. Neste caso, o maior impacto se dá pelo material utilizado para deposição (como mencionado anteriormente), sendo o material base utilizado para estudos com base nas requisições da indústria para a aplicação do processo de manufatura. [16] [17] [18]

Ao analisar, por exemplo, as influências das aplicações de deposições de aços inoxidáveis e de aços macios em ligas de alumínio, é possível observar como as alterações

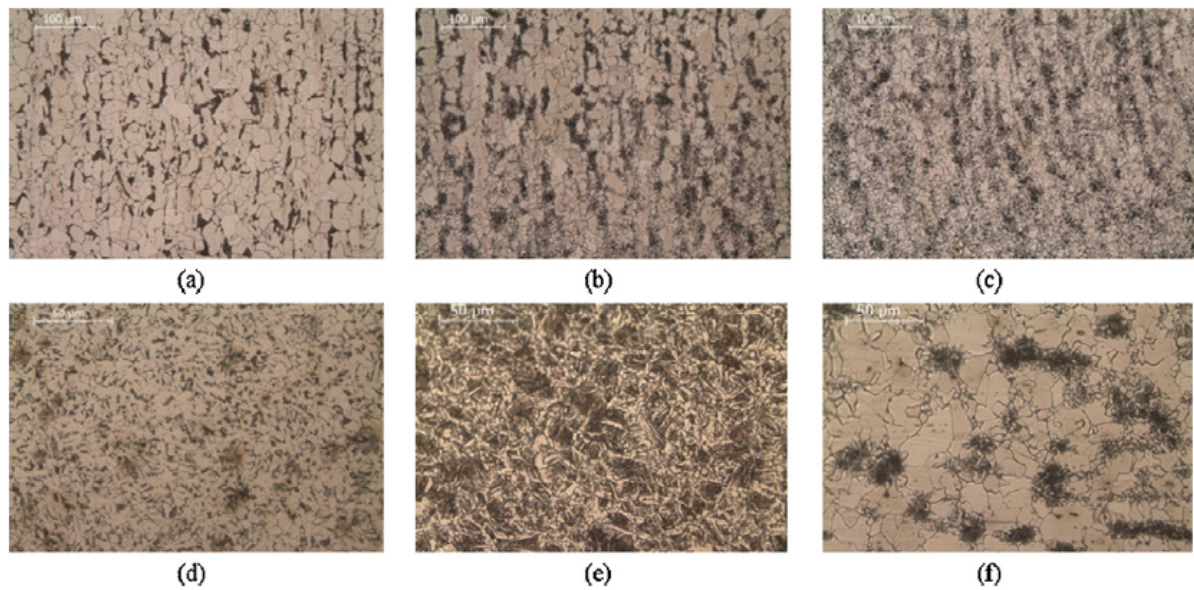


Figura 3.12: Análise microestrutural das diferentes regiões durante o processo de DSF. (a) Metal consumível, (b) Zona influenciada apenas pelo aspecto térmico, (c) Zona influenciada por aspectos térmicos e mecânicos do processo, (d) Estrutura completamente recristalizada, (e) Microestrutura da região de deposição e (f) Região do metal base afetada pelos fenômenos térmicos.

[13]

implicam na eficácia do revestimento. Esses parâmetros podem ser observados por meio da Figura 3.13. [16]

Outro estudo, baseado na deposição de aço ferramenta H13 em ligas de aço com baixo carbono, dá um melhor detalhamento sobre a microestrutura com cada parâmetro de processo aplicado. A Figura 3.14, por exemplo, mostra como a velocidade de deposição afeta na adesão entre os dois materiais. Enquanto velocidades menores causam deposições piores (evidenciadas pelas regiões com lacunas destacadas), o aumento da velocidade gera um caráter mais uniforme e, portanto, melhor conexão entre os materiais. [17]

A microscopia eletrônica de varredura também fortalece os pontos salientados em relação à aderência entre as ligas (mencionada na seção de microestrutura resultante). Melhores processos de adesão surgem de superfícies com maiores irregularidades sendo forçadas umas contra as outras. Portanto, além da temperatura, os processos de ancoramento das estruturas fazem com que a adesão seja fortalecida e mais eficaz. [17] É possível perceber o fenômeno por meio da Figura 3.15.

Logo, é de extrema importância que as interações específicas entre as ligas sejam estudadas de forma a garantir os melhores resultados possíveis. Com base nestas análises, os processos podem ser conduzidos de forma a garantir a maior taxa de sucesso.

Friction surfacing parameters for MS/SS coating on Al 5083

Material	Nominal contact pressure (MPa)	Feed rate (mm s <sup>-1</sup> )	Spindle speed (rpm)	Coating integrity
SS/Al 5083	21.8	1.2	3000	Good coating
SS/Al 5083	21.8	1.2	2000	Good coating
SS/Al 5083	16.35	1.2	3000	No coating
SS/Al 5083	16.35	1.2	2500	No coating
SS/Al 5083	16.35	1.2	1500	No coating
SS/Al 5083	8.175	1.2	3000	No coating
SS/Al 5083	8.175	1.2	2500	No coating
SS/Al 5083	8.175	1.2	1500	No coating
MS/Al 5083	21.8	2.0	3000	Good coating
MS/Al 5083	21.8	2.0	2000	Good coating
MS/Al 5083	16.35	2.0	3000	Good coating
MS/Al 5083	16.35	2.0	2500	Good coating
MS/Al 5083	16.35	2.0	1500	Good coating
MS/Al 5083	8.175	2.0	3000	No coating
MS/Al 5083	8.175	2.0	2500	No coating
MS/Al 5083	8.175	2.0	1500	Fair coating

Figura 3.13: Relação de força axial, taxa de deposição e velocidade de rotação na integridade do revestimento. O metal base é a liga de alumínio 5083, enquanto são aplicados revestimentos com aço inoxidável e aço macio.

[16]

### 3.6 Principais usos e aplicações

O processo de DSF faz parte de um conjunto de métodos que permitem que alcancemos propriedades desejadas em ligas metálicas as quais, caso isoladas, dificilmente seriam obtidas. É possível associar uma liga metálica com custo mais elevado a um material base barato, o que gera um componente de acordo com os requisitos de um projeto e também mantém os custos em uma margem segura. [5]

Estudos anteriores aos anos 90 relatam usos da técnica para reparar componentes danificados e aplicar proteção contra processos corrosivos. Buchas, juntas para rolamentos e componentes agrícolas estão entre os principais alvos de estudos para aplicações em reparações e criações de ligas compostas. Também temos a aplicação do processo para a produção de elementos de corte, reparos de pás de turbinas a vapor e ajustes, principalmente, de elementos laminados em grandes sistemas. [5]

Para mencionar o cenário mais recente de possibilidades, duas aplicações mais robustas e recentes serão mencionadas. Para começar, existem aplicações do processo de DSF em usinas nucleares para reparar componentes desgastados. Como o processo opera com temperaturas bem inferiores às temperaturas de fusão dos componentes, é possível realizar reparos sem grandes consequências à integridade das usinas. Em reatores de água pressurizada (PWR) é possível reparar cordões de solda desgastados sem riscos para o funcionamento geral. Assim, é possível garantir que eventuais trincas não se propaguem pela estrutura e possam gerar acidentes graves. [19]

Além disso, podemos ter a aplicação de uma estrutura móvel para reparos de trilhos de



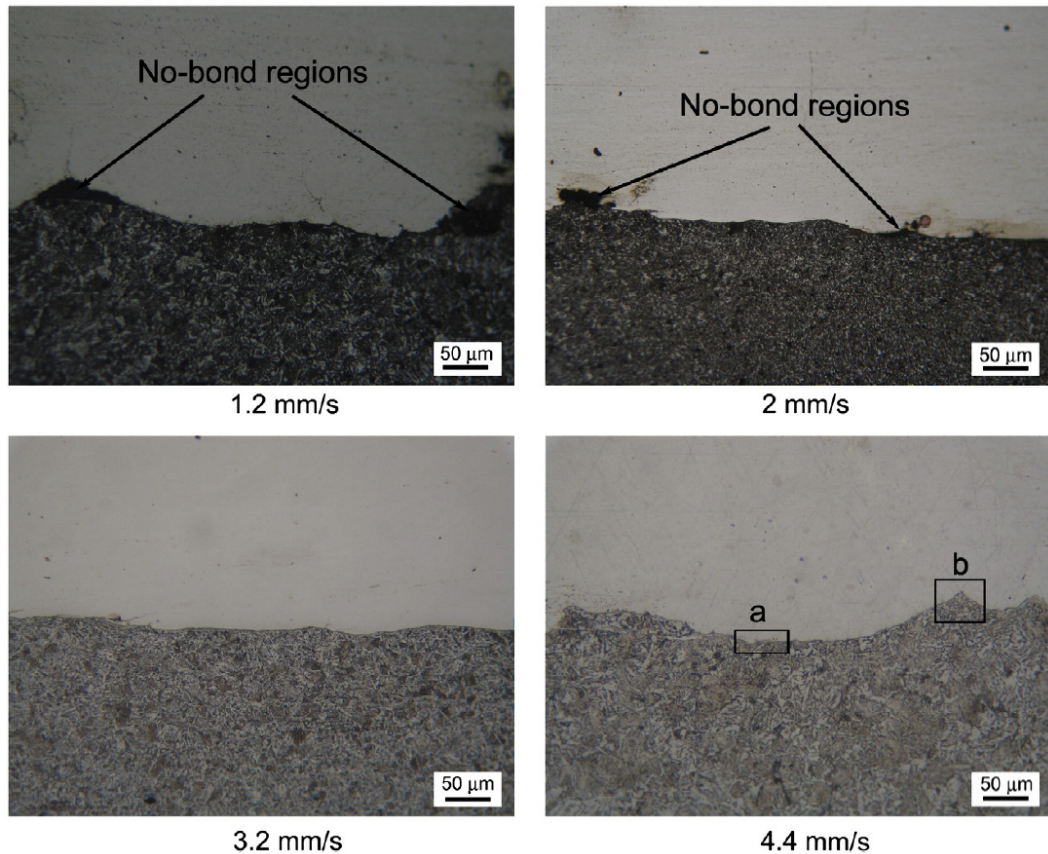


Figura 3.14: Microestruturas da deposição de aço ferramenta H13 em ligas de aço com baixo carbono. As alterações nas velocidades de deposição evidenciam a presença, ou não, de lacunas que acabam influenciando na aderência final.

[17]

trem. Isso gera um custo reduzido, facilita a reestruturação do sistema e torna a logística muito mais simples. A estrutura projetada para o processo pode ser vista por meio da Figura 3.16. [5]

### 3.7 Aspectos ambientais do processo

O processo de DSF possui vantagens ambientais em relação a outros métodos de manufatura aditiva. Por se tratar de um processo que ocorre com materiais no estado sólido e dependendo exclusivamente de fenômenos mecânicos, não ocorre geração de rejeitos para o ambiente. Quando é realizada uma análise em comparação com o revestimento por spray de plasma, fica evidente a vantagem ambiental do mecanismo de DSF e a grande oportunidade para entrar em processos produtivos de forma mais sustentável possível. [20]

Além de eventuais respingos provenientes do processo de revestimento por spray de

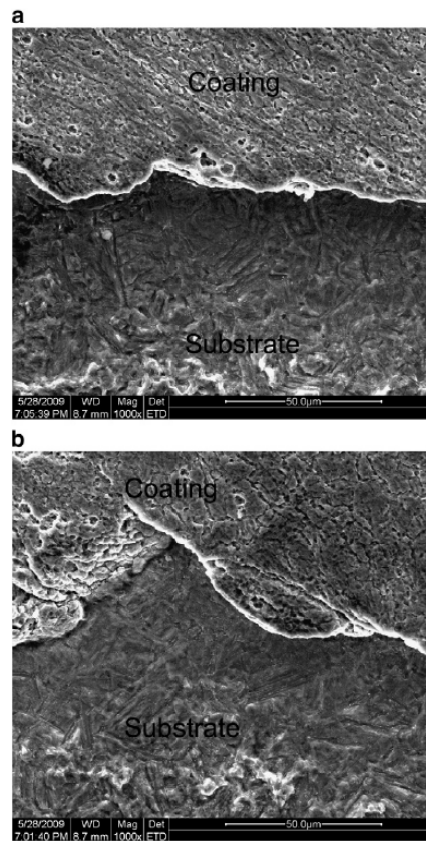


Figura 3.15: Processo de MEV aplicado à amostra submetida a velocidade de deposição de 4,4 m/s da Figura X. As regiões (a) e (b) são vistas com maior detalhamento. A adesão é mais efetiva devido ao ancoramento ocorrido.

[17]

plasma, gases tóxicos e radiação são emitidos. Algumas questões microestruturais também causam efeitos indesejados no produto finalizado, como presença de porosidades, inclusão de escória no material depositado e irregularidades no processo de fusão. [20]

O risco proveniente desses processos não se restringe aos danos ambientais. Também é possível verificar que existem danos à saúde dos seres humanos em contato direto com o processo, sendo estes danos de natureza cumulativa. Danos pulmonares devido à inalação de metais tóxicos, exposições exacerbadas à concentração de pó resultante do processo, formação de partículas ultrafinas, contato com pós metálicos potencialmente cancerígenos e presença de metal no organismo dos trabalhadores (como, por exemplo, presença de altas concentrações de cromo, níquel e cobalto nas urinas) são exemplos de complicações que o procedimento gera. [21]

Portanto, além do espectro ambiental, é vital que tenhamos um olhar voltado para os danos potenciais à saúde dos trabalhadores envolvidos nos processos. É esperada uma quantidade avassaladora de novas contratações para operar estas áreas nos próximos

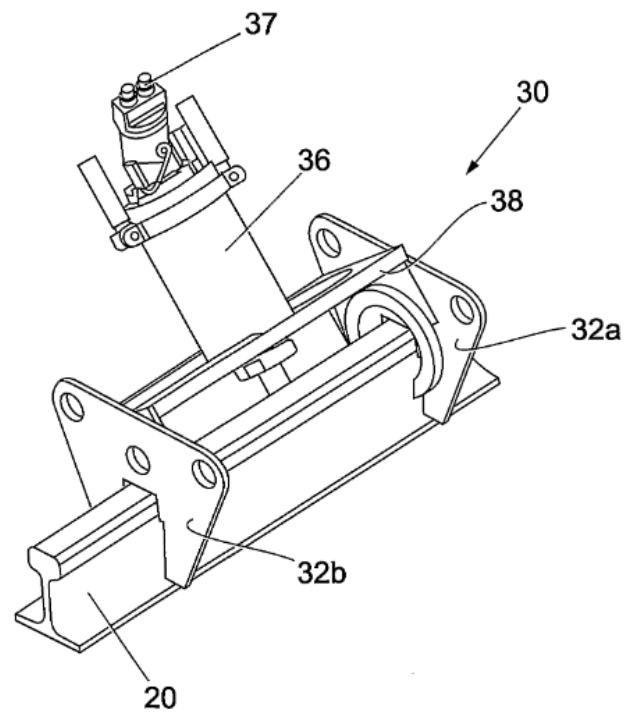


Figura 3.16: Mecanismo idealizado para reparo de trilhos de trem danificados.  
[5]

anos, então medidas de redução dos impactos devem ser estudadas e aplicadas o quanto antes. [21]

## 4 OBSERVAÇÕES FINAIS

Foram realizados testes simples no laboratório do PMT (Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP) com a finalidade de observar, mesmo que de forma bastante simplificada, a natureza do processo.

O primeiro teste, realizado com uma furadeira de mesa, contou com o uso de ligas de alumínio (tanto no material base, quanto no perfil extrudado consumível). A máquina adaptada para o uso, a composição do teste, a tentativa de aplicar fricção e os resultados podem ser vistos por meio das Figuras 4.1 a 4.10.

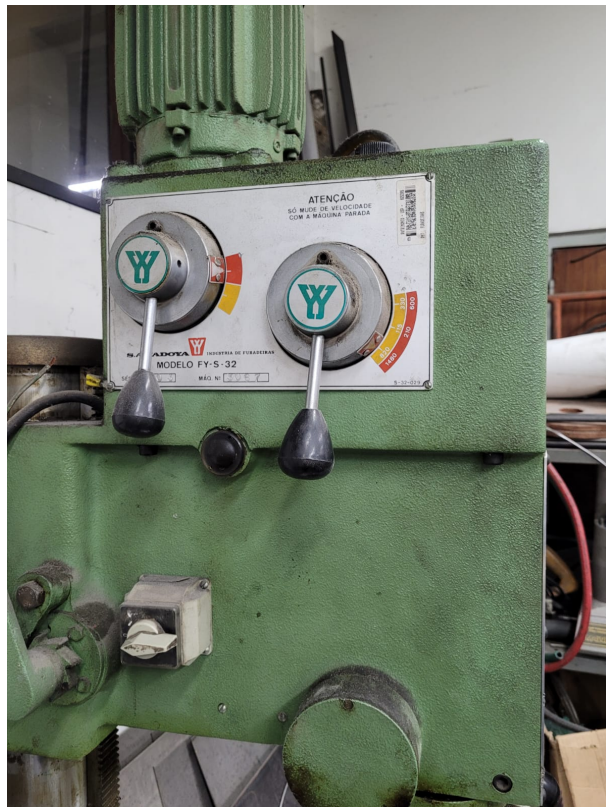


Figura 4.1: Vista lateral da máquina utilizada no teste. [Fonte: De autoria própria.]

Um outro teste, também realizado no PMT, mostra as sucessivas tentativas de deposição, mas dessa vez com auxílio de uma máquina fresadora. Apesar de ser uma máquina com uma fixação mais precisa do que no primeiro teste, ainda é possível visualizar a ro-





Figura 4.2: Vista frontal da máquina utilizada no teste. [Fonte: De autoria própria.]

tação irregular que acaba por não garantir o processo em sua plenitude. Imagens deste teste podem ser vistas por meio das Figuras 4.11, 4.12 e 4.13.

O principal objetivo dos testes, mesmo que de forma bastante simplificada, é demonstrar que resultados bastante indesejados podem ocorrer se não for aplicado um controle preciso. Além disso, mesmo com a mudança de maquinário, ainda não foi o suficiente para que o fenômeno pudesse ser observado.

Todos os pontos se sustentam na base teórica abordada e na importância de parâmetros de processo bem definidos e aplicados. Dessa forma, não é um processo que se mostra tão trivial para aplicações em larga escala e em reparos remotos.



Figura 4.3: Elemento consumível e apoios utilizados para garantir que o metal base permaneça estático. [Fonte: De autoria própria.]



Figura 4.4: Início do teste a partir da movimentação da máquina para estabelecer contato entre as ligas. [Fonte: De autoria própria.]



Figura 4.5: No momento de contato, é possível perceber desalinhamento e oscilações no elemento consumível. [Fonte: De autoria própria.]



Figura 4.6: Outra vista do desalinhamento no elemento consumível. [Fonte: De autoria própria.]





Figura 4.7: Segunda tentativa para o teste. O elemento consumível é retirado, a máquina é regulada novamente, mas o desalinhamento continua presente. [Fonte: De autoria própria.]



Figura 4.8: Aspecto do metal base após o teste. [Fonte: De autoria própria.]



Figura 4.9: Característica macroscópica da liga consumível após o teste. [Fonte: De autoria própria.]



Figura 4.10: Aspecto estrutural relacionado ao processo de torção que o elemento acabou sofrendo no teste. [Fonte: De autoria própria.]



Figura 4.11: Marcas no metal base mostram o processo de tentativa de deposição em pontos distintos. [Fonte: De autoria própria.]



Figura 4.12: Formação inicial da região de rebarba. É o indicativo do processo de DSF.  
[Fonte: De autoria própria.]





Figura 4.13: Vista expandida mostrando a estrutura mais robusta do fresador. [Fonte: De autoria própria.]

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do estudo teórico do processo de DSF, da análise das evoluções do processo e todas as questões microestruturais envolvidas, é possível concluir que, apesar de ainda ser um processo muito custoso em termos financeiros, houve grande avanço nos estudos da área e aplicações cada vez mais plurais do método podem ser vistas. [5]

A técnica de manufatura aditiva se mostra extremamente importante em quesitos de segurança ambiental, segurança do trabalho [21] e praticidade em reparos associados a estruturas complexas. [5] Além de ser vital em aplicações para setores estratégicos (como o setor energético), é necessária como forma alternativa a métodos já existentes. [20]

Com a projeção de demanda trabalhista ainda maior em processos relacionados ao setor metalúrgico, é imprescindível que a saúde dos trabalhadores seja preservada. Também tem sido uma demanda cada vez maior que os processos sejam ambientalmente amigáveis e garantam que as futuras gerações possam desfrutar de condições de vida adequadas assim como nós. [21]

Por fim, é preciso maior investimento para baratear o processo e torná-lo mais acessível. Como visto nos estudos da bibliografia, é necessária grande precisão para que a técnica ocorra de forma adequada. Portanto, caso seja projetada para ser aplicada em escala industrial ou em reparos remotos, é preciso que existam tecnologias mais atrativas do ponto de vista financeiro e prático. [5]

## REFERÊNCIAS

- 1 SEIDI, E.; MILLER, S. F.; CARLSON, B. E. Friction surfacing deposition by consumable tools. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, v. 143, n. 12, 2021.
- 2 KLOPSTOCK, H. An improved method of joining or welding metals. *Patent specification Ref. 572789*, 1941.
- 3 VALE, N. d. et al. Effects of friction surfacing on the characteristics of consumable rods of ti-6al-4v. *Materials Research*, SciELO Brasil, v. 22, 2020.
- 4 BEDFORD, G. M.; RICHARDS, P. J. *Method of forming hard facings on materials*. [S.l.]: Google Patents, 1990. US Patent 4,930,675.
- 5 GANDRA, J. et al. Friction surfacing—a review. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 214, n. 5, p. 1062–1093, 2014.
- 6 BATCHELOR, A. et al. The effect of metal type and multi-layering on friction surfacing. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 57, n. 1-2, p. 172–181, 1996.
- 7 THOMAS, W. An introduction to friction surfacing. In: *Surface Engineering Conf.'85*. [S.l.: s.n.], 1985. v. 3, p. 261.
- 8 FUKAKUSA, K. On the characteristics of the rotational contact plane—a fundamental study of friction surfacing. *Welding International*, Taylor & Francis, v. 10, n. 7, p. 524–529, 1996.
- 9 LIU, X. M. et al. Figuration control of deposit in friction surfacing. In: TRANS TECH PUBL. *Key Engineering Materials*. [S.l.], 2008. v. 373, p. 806–810.
- 10 SEIDI, E.; MILLER, S. F. A novel approach to friction surfacing: experimental analysis of deposition from radial surface of a consumable tool. *Coatings*, MDPI, v. 10, n. 11, p. 1016, 2020.
- 11 BARARPOUR, S. M.; AVAL, H. J.; JAMAATI, R. Modeling and experimental investigation on friction surfacing of aluminum alloys. *Journal of alloys and compounds*, Elsevier, v. 805, p. 57–68, 2019.
- 12 SAHOO, D. K. et al. An experimental study on friction surfaced coating of aluminium 6063 over aisi 316 stainless steel substrate. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, v. 40, p. S10–S18, 2021.
- 13 GANDRA, J.; MIRANDA, R.; VILAÇA, P. Performance analysis of friction surfacing. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 212, n. 8, p. 1676–1686, 2012.
- 14 BARARPOUR, S. M.; AVAL, H. J.; JAMAATI, R. Mechanical alloying by friction surfacing process. *Materials Letters*, Elsevier, v. 254, p. 394–397, 2019.

- 15 VITANOV, V.; VOUTCHKOV, I. Process parameters selection for friction surfacing applications using intelligent decision support. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 159, n. 1, p. 27–32, 2005.
- 16 CHANDRASEKARAN, M.; BATCHELOR, A. W.; JANA, S. Friction surfacing of metal coatings on steel and aluminum substrate. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 72, n. 3, p. 446–452, 1997.
- 17 RAFI, H. K. et al. Friction surfaced tool steel (h13) coatings on low carbon steel: A study on the effects of process parameters on coating characteristics and integrity. *Surface and Coatings Technology*, Elsevier, v. 205, n. 1, p. 232–242, 2010.
- 18 RAFI, H. K. et al. Microstructural evolution during friction surfacing of tool steel h13. *Materials & Design*, Elsevier, v. 32, n. 1, p. 82–87, 2011.
- 19 YAMASHITA, Y.; FUJITA, K. Newly developed repairs on welded area of lwr stainless steel by friction surfacing. *Journal of nuclear science and technology*, Taylor & Francis, v. 38, n. 10, p. 896–900, 2001.
- 20 MACEDO, M. L. Kramer de et al. Deposit by friction surfacing and its applications. *Welding International*, Taylor & Francis, v. 24, n. 6, p. 422–431, 2010.
- 21 ANTONINI, J. M. et al. Review of the physicochemical properties and associated health effects of aerosols generated during thermal spray coating processes. *Toxicology and industrial health*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 37, n. 1, p. 47–58, 2021.