



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

FRANCISCO JOSÉ VIEIRA DE OLIVEIRA JÚNIOR

ANÁLISE DA MUDANÇA DO PERFIL GEOMÉTRICO DA FERRAMENTA SOBRE
AS CARACTERÍSTICAS SIMULADAS NA SOLDAGEM FSW DO AÇO
INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 304L

FORTALEZA

2021

FRANCISCO JOSÉ VIEIRA DE OLIVEIRA JÚNIOR

ANÁLISE DA MUDANÇA DO PERFIL GEOMÉTRICO DA FERRAMENTA SOBRE AS
CARACTERÍSTICAS SIMULADAS NA SOLDAGEM FSW DO AÇO INOXIDÁVEL
AUSTENÍTICO AISI 304L

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Cleiton Carvalho Silva

Coorientador: Prof. Dr. Yuri Cruz da Silva

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

O47a Oliveira Júnior, Francisco José Vieira de.
Análise da mudança do perfil geométrico da ferramenta sobre as características simuladas na soldagem FSW do aço inoxidável austenítico AISI 304L / Francisco José Vieira de Oliveira Júnior. – 2021.
37 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Cleiton Carvalho Silva.
Coorientação: Prof. Dr. Yuri Cruz da Silva.

1. Friction Stir Welding. 2. Ferramenta do FSW. 3. Aço inoxidável. 4. AISI 304L. 5. Simulação numérica. I. Título.

CDD 669

FRANCISCO JOSÉ VIEIRA DE OLIVEIRA JÚNIOR

ANÁLISE DA MUDANÇA DO PERFIL GEOMÉTRICO DA FERRAMENTA SOBRE AS
CARACTERÍSTICAS SIMULADAS NA SOLDAGEM FSW DO AÇO INOXIDÁVEL
AUSTENÍTICO AISI 304L

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Metalúr-
gica do Centro de Tecnologia da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do grau de bacharel em Engenharia
Metalúrgica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cleiton Carvalho Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Yuri Cruz da Silva (Coorientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Francisco Marcondes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais e minha irmã.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Vânia Maria Silveira de Oliveira e Francisco José Vieira de Oliveira pelo apoio incondicional e suporte nas minhas escolhas de vida.

A minha irmã Lívia Silveira de Oliveira por estar ao meu lado me suportando a todo momento.

À minha família pelo apoio em todos os momentos da minha vida.

À minha prima Valdivia de Brito Silveira por ser a pessoa que eu sei que posso contar a qualquer momento para qualquer coisa.

Ao Professor e orientador Dr. Cleiton Carvalho Silva pela orientação, ensinamentos tanto na elaboração desse trabalho quanto na minha vida acadêmica que me inspirou a desejar trilhar um caminho acadêmico e de pesquisador.

Ao meu coorientador Dr. Yuri Cruz da Silva pela orientação, oportunidade e ponta-pé inicial para eu iniciar minha jornada na área de pesquisa, que me enriqueceu de várias maneiras.

Ao Prof. Dr Francisco Marcondes por ter aceitado a ser membro da banca e dedicar seu tempo a este trabalho.

Ao Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS) pela oportunidade de realização deste trabalho.

A Fundação ASTEF pela bolsa de pesquisa que me proporcionou um auxílio durante minha jornada acadêmica.

Aos professores do laboratório de engenharia da soldagem o Dr. Hélio Cordeiro de Miranda, Dr. Marcelo Ferreira Motta e Dr. Willys Machado Aguiar, pelos ensinamentos em minha jornada.

A todos os companheiros que fizeram e ainda fazem parte do LPTS durante o período da minha graduação.

Aos meus amigos Samuel Brito, Bárbara Pontes, Álvaro Jorge, Ana Stherfane que tenho desde o período do IFCE se tornaram meus parceiros de vida.

Aos meus amigos Francisco Marcélio, Mateus Capistrano, Gabriel Saraiva, Reginaldo Rodrigues, Michael Dyonns, Rafael Santiago e Matheus Soares pela amizade e momentos de descontração que passamos juntos.

“Pode se encontrar a felicidade mesmo nas horas mais sombrias, se a pessoa se lembrar de acender a luz.”

(Alvo Dumbledore)

RESUMO

Friction Stir Welding (FSW) é um processo de soldagem desenvolvido no The Welding Institute (TWI) que consiste na união de chapas de metal abaixo da temperatura de fusão do material, utilizando a deformação plástica provocada pela rotação da ferramenta. A geometria da ferramenta é um dos fatores essenciais para uma soldagem bem sucedida, pois ela é quem, de acordo com os parâmetros de soldagem utilizados, vai realizar a mistura do material no estado plástico. Como os aços inoxidáveis austeníticos são amplamente utilizados na indústria, o material escolhido para o estudo foi o AISI 304L. A simulação numérica do FSW vem sendo estudada recentemente e cada vez mais autores contribuem para o avanço de um método cada vez mais eficiente. Este estudo tem como principal objetivo analisar um novo perfil de ferramenta na simulação da soldagem FSW do aço inoxidável austenítico AISI 304L, comparando-o com resultados prévios obtidos com uma configuração de ferramenta simplificada. Foram realizadas 7 simulações com diferentes parâmetros de soldagem e avaliados os resultados de temperatura e viscosidade foram comparados com simulações anteriores e com as macrografias dos mesmos. Os resultados do presente estudo mostraram que a mudança da ferramenta provoca um aumento da temperatura de pico observada em pontos semelhantes, bem como um diferente perfil de distribuição de calor ao longo da seção transversal, devido à uma alteração nas condições de condução do calor ao longo da peça. Além disso, a mudança no perfil da ferramenta também provocou alterações no comportamento da viscosidade, indicando zonas de (baixa/alta) viscosidade em regiões nas quais ocorreram a formação de defeitos como vazios tipo túnel ou reentrâncias tipo gancho, especificamente na região de retrocesso da ferramenta. Isto demonstra que a simulação do comportamento da viscosidade pode ser efetivo para prever a formação de determinados tipos de defeitos. Outra análise foi tentativa de identificação dos limites das diferentes regiões da solda: zona de mistura, zona termomecanicamente afetada e zona afetada pelo calor. Alguns critérios foram propostos para a identificação destas zonas por meio de simulação numérica.

Palavras-chave: Friction Stir Welding. Ferramenta do FSW. Aço Inoxidável. AISI 304L. Simulação Numérica

ABSTRACT

Friction Stir Welding (FSW) is a welding process developed at The Welding Institute (TWI) that consists of joining metal sheets below the melting temperature of the material, using the plastic deformation caused by the rotation of the tool. The geometry of the tool is one of the essential factors for successful welding, since it is the one who, according to the welding parameters used, will perform the mixing of the material in the plastic state. As austenitic stainless steels are widely used in industry, the material chosen for the study was AISI 304L. The numerical simulation of FSW has been studied recently, and more and more authors contribute to the advancement of an increasingly efficient method. This study has as main objective to analyze a new tool profile in the simulation of FSW welding of AISI 304L austenitic stainless steel, comparing it with previous results obtained with a simplified tool configuration. Seven simulations were carried out with different welding parameters, and the results of temperature and viscosity were evaluated and compared with previous simulations and with their macrographs. The present study results showed that changing the tool causes an increase in the peak temperature observed at similar points, and a different profile of heat distribution along the cross section, due to a change in the conditions of heat conduction along with the piece. In addition, the change in the tool profile also caused changes in the viscosity behavior, indicating zones of (low / high) viscosity in regions where defects such as tunnel voids or hook-like recesses have occurred, specifically in the retreating side of the tool. This demonstrates that the simulation of the viscosity behavior can be effective in predicting certain types of defects. Another analysis was an attempt to identify the limits of the different regions of the weld: mixing zone, thermomechanically affected zone and heat affected zone. Some criteria have been proposed for the identification of these zones through numerical simulation.

Keywords: Friction Stir Welding. FSW tool. Stainless Steel. AISI 304L. Numerical Simulation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático da soldagem FSW destacando a posição da ferramenta, sua orientação e movimento em relação à peça.	16
Figura 2 – Ferramenta FSW	17
Figura 3 – Esquema de soldagem	21
Figura 4 – Perfil das ferramentas. a) Ferramenta simplificada (SILVA <i>et al.</i> , 2020); b) Ferramenta atualizada (SILVA, 2021)	22
Figura 5 – Teste de coeficiente de atrito	25
Figura 6 – Comparação dos valores de temperatura do Teste 1 de termopares; a) do lado de avanço com o simulado; b) do lado de retrocesso com o simulado	26
Figura 7 – Comparação dos valores de ciclo térmico do Teste 1	26
Figura 8 – Perfil de temperatura na transversal do pino novo, superior, em paralelo ao Silva <i>et al.</i> (2020), inferior. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3; d) Teste 4; e) Teste 5; f) Teste 6; g) Teste 7	28
Figura 9 – Comparação da propagação de calor. a) Antiga; b) Nova	29
Figura 10 – Comparativo da macrografia com o perfil de viscosidade na transversal do pino. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3; d) Teste 4; e) Teste 5; Teste 6; Teste 7	31
Figura 11 – Análise das zonas de soldagem do Teste 1. a) Macrografia; b) Temperatura; c) Viscosidade; d) Velocidade	32
Figura 12 – Análise das zonas de soldagem do Teste 3. a) Macrografia; b) Temperatura; c) Viscosidade; d) Velocidade	33
Figura 13 – Análise das zonas de soldagem do Teste 4. a) Macrografia; b) Temperatura; c) Viscosidade; d) Velocidade	33
Figura 14 – Análise da região de precipitação. a) Teste 3; b) Teste 4	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 304L(% mass) .	15
Tabela 2 – Parâmetros utilizados	20
Tabela 3 – Composição química do aço inoxidável AISI 304L (% mass)	20
Tabela 4 – Propriedades Térmicas	20

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo Geral	13
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>13</i>
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Aço inoxidável	14
<i>2.1.1</i>	<i>Aços inoxidáveis austeníticos</i>	<i>14</i>
<i>2.1.1.1</i>	<i>AISI 304L</i>	<i>15</i>
2.2	Friction Stir Welding	15
<i>2.2.1</i>	<i>Ferramenta do FSW</i>	<i>16</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Defeitos de soldagens por FSW</i>	<i>18</i>
2.3	Simulação do FSW	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1	Materiais	20
3.2	Metodologia	21
<i>3.2.1</i>	<i>Condições de contorno</i>	<i>22</i>
4	RESULTADOS	25
5	CONCLUSÕES	35
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

A soldagem pelo processo Friction Stir Welding (FSW), desenvolvida pelo The Welding Institute (TWI, UK), visa obter um material soldado utilizando a deformação plástica do material advinda do calor gerado pela fricção e rotação de uma ferramenta sobre as chapas a serem soldadas. É um processo ainda novo, se comparado aos métodos de soldagem por fusão. Algumas vantagens deste processo é que ao final da soldagem o há um bom acabamento superficial, e também possibilita a junção em qualquer posição. Assim, a sua utilização nas indústrias tem sido incentivada, visto que promove uma rapidez na linha de produção e também é destacado que o processo FSW não alcança a temperatura de fusão do material, o que auxilia a soldagem de materiais que ao serem soldados por processos de fusão, ao serem soldados por processos de soldagem por fusão, apresentam fenômenos físico-químico-metalúrgicos que promovem o surgimento de trincas durante a solidificação. Assim, é possível soldar com sucesso estes materiais de difícil soldabilidade por fusão.

Este processo vem sendo estudado experimentalmente cada vez mais, justamente para saber os melhores parâmetros para realizar a soldagem de diversos materiais, visto que o mecanismo de geração de calor do processo FSW e de fluxo massa são complexos, pois dependem de diferentes combinações de parâmetros que dependendo podem estar atrelados ou não na formação de defeitos.

O FSW tem como uma de suas vantagens a soldagem de materiais que apresentam defeitos devido a solidificação, como a precipitação de elementos de liga, o crescimento no grão na zona fundida, microestruturas que ocasionam a fragilidade do material, como a martensita e etc, já que este processo não atinge a temperatura de fusão do material.

Os aços inoxidáveis, são aços que são bastantes utilizados devido a sua resistência a corrosão, que contém uma variedade de elementos de liga que proporcionam para o material diversas características que melhoram seu manuseio e aplicações. Estes aços tem um alto teor de Cromo, que é o que os caracterizam por serem inoxidáveis.

Neste estudo será analisado no aço inoxidável austenítico, especificamente o AISI 304L. Este por sua vez, possui alto desempenho na resistência à corrosão nos diferentes ambientes a que está exposto, como na indústria de alimentos, automobilística e biomedicina, e alta ductilidade, tenacidade e em geral uma boa soldabilidade.

Estudos de simulação estão cada vez mais ganhando destaque no ambiente acadêmico da soldagem, uma vez que a simulação auxilia na previsão de resultados, ajudando o processo

a ser realizado de maneira mais objetiva, e conseqüentemente reduzir o desperdício de um material. Como uma vez desenvolvido um modelo de simulação validado, é possível realizar diferentes simulações com uma variedade de parâmetros de soldagem e com isso ter um maior conhecimento sobre a soldagem do material.

O software Fluent é utilizado para fazer diversas simulações envolvendo fluidos, mas também é utilizado para simulações de soldagem utilizando o processo FSW por diversos autores para estudar o comportamento e a análises dos parâmetros de soldagem de cada material. É utilizado nesses casos de simulações um fluido de alta viscosidade, com as mesmas propriedades do material, implementadas ao software, e assim é possível obter resultados confiáveis.

1.1 Objetivo Geral

O presente estudo tem por objetivo principal a análise de um novo perfil de ferramenta na simulação da soldagem do aço inoxidável AISI 304L, e a sua influencia sobre a distribuição de temperatura, do comportamento da viscosidade, do fluxo de calor e de massa, em razão dos parâmetros de soldagem aplicados.

1.1.1 Objetivos específicos

- Validar a simulação com a nova ferramenta;
- Analisar o comportamento da temperatura se com a nova ferramenta;
- Analisar o comportamento da viscosidade se com a nova ferramenta;
- Avaliar se os novos resultados auxiliam na previsão de defeitos na soldagem FSW desta liga;
- Identificar com os resultados simulados as diferentes zonas da solda: zona de mistura, zona termomecanicamente afetada e zona afetada pelo calor;
- Identificar a região crítica para precipitação de carbonetos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aço inoxidável

O aço inoxidável tem diversas aplicações na indústria, devido à sua manufaturabilidade, soldabilidade e excelente propriedade de resistência à corrosão (SWITZNER *et al.*, 2019). Um metal para ser considerado inoxidável deve ter em sua composição aproximadamente 10,5% de Cromo (DAVIS, 1994). Existem quatro categorias de aços inoxidáveis, são elas: ferrítico, martensítico, austenítico e endurecido por precipitação (SMITH, 1993).

Os aços inoxidáveis ferríticos contém entre 11% a 30% de Cr com um carbono abaixo de 0,12%. Sua microestrutura é formada basicamente de ferrita, Por esse motivo há a presença de elementos que estabilizam a ferrita como o nióbio, molibdênio alumínio e titânio. Eles apresentam uma ductilidade e soldabilidade menor se comparado aos aços inoxidáveis austeníticos (SMITH, 1993).

Os aços inoxidáveis martensíticos contém entre 11% a 30% de Cr com carbono até uma faixa de 0,1 a 1. Este aço passa por um tratamento térmico, conhecido como têmpera, para que haja a formação de martensita. Quando maior a presença do carbono na sua composição química, maior será a sua dureza após o tratamento térmico (SMITH, 1993).

Os aços inoxidáveis austeníticos contém entre 6% a 22% de Cr e entre 7% a 20% de C. Sua microestrutura é formada por uma matriz austenítica a temperatura ambiente. São muito utilizados pelo mundo devido a sua ductilidade, excelente resistência a corrosão e trabalhabilidade (SMITH, 1993).

Os aços inoxidáveis endurecidos por precipitação contém entre 10% a 30% de Cr e também apresenta uma variação na proporção de Ni e Mo. A precipitação nesse tipo de aço ocorre devido a presença de Cu, Al, Ti e Nb. Quando submetido a altas temperaturas suas propriedades mecânicas ainda são boas sem uma grande perda da sua resistência a corrosão (SMITH, 1993).

2.1.1 Aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos foram desenvolvidos no começo do século 20 na Alemanha. De acordo com o progresso do seu desenvolvimento, fez com que resultasse em um aço com uma composição química complexa que era composta por vários elementos de liga (PADILHA; RIOS, 2002).

Devido aos elementos de liga presentes, como o Cr e Ni, esses aços possuem alta resistência à corrosão nos diferentes ambientes a que está exposto e alta ductilidade, tenacidade e em geral uma boa soldabilidade (LIPPOLD; KOTECKI, 2005).

Algumas das principais características dos aços inoxidáveis austeníticos são que eles não são magnéticos e não são endurecíveis devido a presença da austenita, o que é auxiliado de acordo com o nível de níquel que se encontra no material, pois ele é um estabilizador de austenita (CHIAVERINI, 2002). Um exemplo deste tipo de aço é o AISI 304L.

2.1.1.1 AISI 304L

O AISI 304L é um aço inoxidável austenítico. Este por sua vez, possui alto desempenho quanto a resistência à corrosão nos diferentes ambientes a que está exposto e alta ductilidade, tenacidade e, em geral, uma boa soldabilidade (LIPPOLD; KOTECKI, 2005).

O índice L na nomenclatura do aço indica que ele tem uma menor presença de carbono na sua composição, tendo como referência o AISI 304. O que pode ser visto a comparação na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 304L(% mass)

Material	C	Cr	Mn	Ni	Si
304	0.04	19.00	1.00	9.25	0.40
304L	0.02	19.00	1.00	10.00	0.40

Fonte: (LIPPOLD; KOTECKI, 2005)

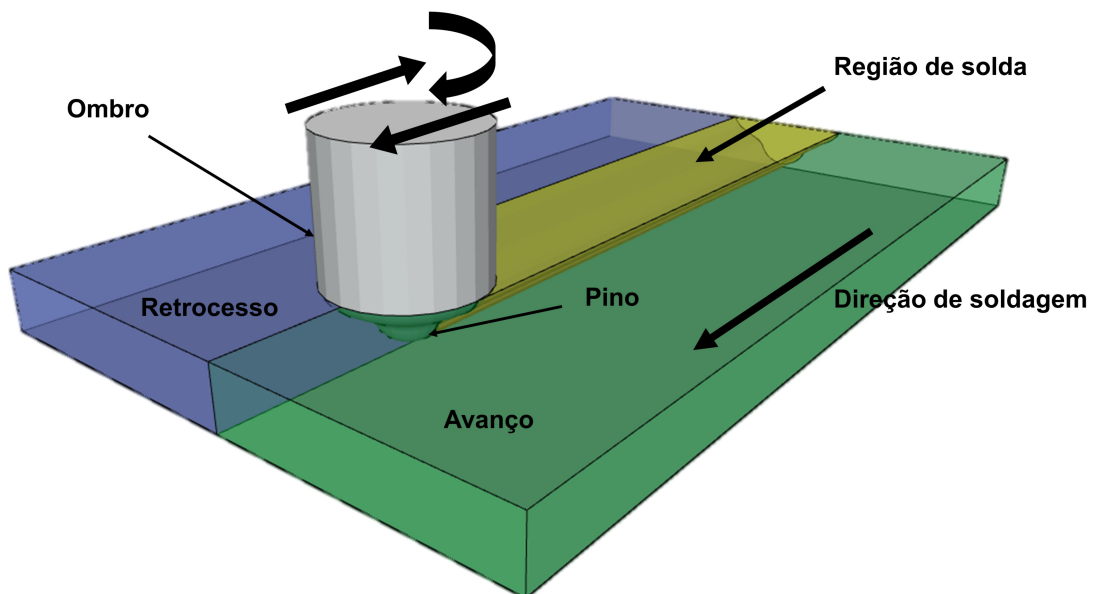
Devido a alta aplicação do AISI 304L em componentes do setor industrial e automobilístico, se mostrou necessário o estudo do comportamento desse aço quando submetido a uma soldagem FSW para ser analisado, como se comportava sua microestrutura, sua dureza e soldabilidade (JABRAEILI *et al.*, 2021).

2.2 Friction Stir Welding

Em 1991, foi desenvolvido pelo The Welding Institute (TWI, UK) o Friction Stir Welding (THOMAS *et al.*, 1991), no qual uma ferramenta, que possui um pino e um ombro, gira em alta velocidade e pelo calor gerado e a deformação plástica o processo de soldagem será realizado, visto que a força de atrito entre a ferramenta e a peça gera calor que diminui a resistência ao escoamento da peça facilitando a deformação plástica e o fluxo de material ao redor da ferramenta.(HERMENEGILDO *et al.*, 2017).

Na Figura 1, podemos analisar como este tipo de processo é realizado. Existe uma ferramenta que irá rotacionar e transladar sobre as chapas a serem soldadas e aplicando uma força axial, ela é uma peça única que para fins teóricos pode-se ser dividida em ombro e pino. Há uma divisão de nomenclatura no qual o lado em que a ferramenta rotaciona a favor da direção de soldagem é chamada de avanço e no lado que ela rotaciona contrária a direção de soldagem é chamada de retrocesso. O avanço é o lado em que a direção de rotação da do pino e a direção transversal da ferramenta tem o mesmo sentido, por causa do movimento para frente da ferramenta, o material quer fluir de volta, mas a rotação da superfície do pino se opõe a esse fluxo em este lado da ferramenta. O lado de retrocesso é aquele em que direção de rotação do pino e a direção transversal da ferramenta tem o sentido oposto, o fluxo de material é mais fácil neste lado do pino da ferramenta, pois a superfície do pino ajuda o material a fluir para trás (MISHRA *et al.*, 2014).

Figura 1 – Desenho esquemático da soldagem FSW destacando a posição da ferramenta, sua orientação e movimento em relação à peça.



Fonte: elaborado pelo autor.

2.2.1 Ferramenta do FSW

A ferramenta utilizada no processo tem um papel importante de aquecer e misturar o material a ser soldado, fazendo com que o calor gerado pela fricção seja conduzido pelo material e com a rotação e translação realizada, o fluxo de material próximo a região do pino é misturado

(BASHEER *et al.*, 2010).

A configuração da ferramenta (ombro e pino) utilizada no processo FSW vem sendo estudada para saber qual a melhor combinação que irá resultar em uma soldagem com o menor número de defeitos possíveis e microestrutura desejada (SUNNAPU; KOLLI, 2020; BAKKIYARAJ *et al.*, 2020; LIN *et al.*, 2008a; LIN *et al.*, 2008b). Também é estudado como os parâmetros de soldagem: rotação, velocidade de soldagem, força axial, dentre outros, influenciam no resultado final da soldagem, juntamente com a configuração do ombro e pino da ferramenta, visto que o perfil do pino é um dos fatores que influenciam no comportamento da mistura final (Venkat Ramana *et al.*, 2021).

Figura 2 – Ferramenta FSW



Fonte: (CAETANO, 2016)

Considerando a demanda por uma ferramenta que conseguisse soldar materiais de alto ponto de fusão, capaz de suportar temperaturas tão elevadas quanto 1000°C, foi desenvolvida uma ferramenta feita de nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN), conforme apresentado na Figura 2. Ela é utilizada para soldar metais ferrosos e não ferrosos, e em aços inoxidáveis teve uma alta eficiência mesmo a altas velocidades de soldagem e de rotação (CAETANO, 2016).

A geometria da ferramenta é muito importante para gerar uma solda de qualidade, pois ela pode fazer com que a força axial utilizada seja reduzida, auxilia na penetração do pino, aumenta a interface de interação entre o pino e o fluxo de material, dentre outras vantagens (GIBSON *et al.*, 2014)

2.2.2 Defeitos de soldagens por FSW

Os defeitos de soldagem existe no processo FSW, como qualquer outro processo de soldagem. O importante é analisar o que está causando esses defeitos e melhorar os parâmetros utilizados no processo para que eles não ocorram. Alguns dos defeitos que podem acontecer são a presença de rebarba, a falta de preenchimento e trincas.

A formação de rebarbas durante o processo FSW se deve à uma combinação de fatores, por exemplo, uma alta rotação gera uma maior quantidade de energia para o processo, elevando a temperatura do material devido a energia causada pelo contato entre a peça e a ferramenta. Aliado a isso uma baixa velocidade de soldagem faz com que essa energia seja aplicada por mais tempo, também ocasionando um aumento da temperatura, visto que uma mesma porção do material está em contato a mais tempo com a ferramenta. Atrelado a esses fatores, a força axial que está sendo aplicada, pode ser suficiente para que haja uma liberação de material para os lados da ferramenta produzindo as rebarbas, pois o material com uma elevada temperatura estará com uma viscosidade mais baixa (KIM *et al.*, 2006).

A falta de preenchimento no processo FSW pode ocorrer por causa de diferentes fatores. Um deles pode ser devido a ao fluxo incorreto do material, o que pode ser prevenido de acordo com os parâmetros utilizados. Um parâmetro que causa esse tipo de defeito é uma alta velocidade de soldagem, pois ela pode causar uma grande diferença nos valores obtidos nas temperaturas de topo e na base do material (KIM *et al.*, 2006). Outro fator que pode fazer com que a solda não apresente esse defeito é a geometria da ferramenta utilizada, pois ela influencia no modo como o fluxo do material se comporta (PADMANABAN; BALASUBRAMANIAN, 2009)

As trincas na região da raiz são formadas devido ao calor que foi era necessário para chegar até a base da chapa ser insuficiente, assim não conseguindo resultar em uma soldagem efetiva. Este defeito interno é causado majoritariamente devido as rebarbas aderidas no entorno do pino da ferramenta na forma de ganchos, o que reduz a espessura do material (MAHTO *et al.*, 2020). Como também a não quebra da camada de óxidos pode resultar nesse tipo de defeito (SONI *et al.*, 2017)

2.3 Simulação do FSW

Com o desenvolvimento computacional, foi possível começar estudos de simulação dos mais diversos processos, com o FSW não foi diferente. Diversos trabalhos foram importantes para que vários tipos de materiais metálicos fossem testados nessa técnica, fazendo com que estudos, que em teoria tentam descrever a possível formação de defeitos, sejam estimulados (NANDAN *et al.*, 2006a; NANDAN *et al.*, 2008; CHO *et al.*, 2013; ZHU *et al.*, 2016).

A simulação computacional do processo FSW que temos atualmente começou com o trabalho feito por Frigaard *et al.* (2001), no qual foi simulado um processo FSW em que o atrito era a única fonte de energia para o processo. Logo depois, outros trabalhos foram feitos onde se iniciou a utilização de CFD (Computational Fluid Dynamics) no processo (SEIDEL; REYNOLDS, 2003).

com a expansão do modelo para três dimensões, como proposto por Ulysse (2002) começaram a realizar simulações em 3D utilizando ligas de alumínio e tendo resultados satisfatórios na previsão da temperatura, junto com as tensões que a ferramenta era submetida e as falhas de soldagem ocorridas.

Ao passo que essas simulações progrediam com o fornecimento de importantes resultados, notou-se a necessidade de simular diferentes materiais como por exemplo o aço inoxidável austenítico 304L analisado no trabalho de Nandan *et al.* (2006b) e o aço inoxidável ferrítico estudado por Cho *et al.* (2013).

Em recentes trabalhos o desenvolvimento de modelos para previsão do comportamento de soldas dissimilares tem sido proposto, como por exemplo no estudo realizado por Carreon *et al.* (2017), o qual simulou a união de um AISI 1008 com um AISI 1078.

Embora se tenha avançado bastante no desenvolvimento dos modelos, ainda existem pontos e aplicações em que estes podem não representar satisfatoriamente o comportamento das soldas, indicando ainda ser um campo bastante propício para avanços nos modelos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Neste estudo foi analisado o comportamento do aço inoxidável AISI 304L durante o processo FSW, no qual foram modificados os parâmetros como rotação, velocidade de soldagem e força axial, conforme apresentado na Tabela 2. No qual será possível fazer análises da influência da força axial em baixa e alta rotação, como também o impacto da velocidade de soldagem quando o material é submetido a uma alta rotação e ainda uma análise da mudança da rotação da ferramenta.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados

	Força Axial (KN)	Velocidade de Soldagem (mm/s)	Rotação (RPM)
Teste 1	35	1,00	450
Teste 2	50	1,00	450
Teste 3	15	1,00	800
Teste 4	20	1,00	800
Teste 5	35	1,00	800
Teste 6	35	1,25	800
Teste 7	35	1,50	800

Fonte: (SILVA *et al.*, 2020)

A composição química da peça de aço inox AISI 304L com 200x500x4 mm é apresentada na Tabela 3 e as propriedades que foram colocadas no Fluent estão na tabela 4.

Tabela 3 – Composição química do aço inoxidável AISI 304L (% mass)

Material	Fe	C	Cr	Mn	Ni	P	Si	S	Mo
304L	Bal.	0.026	18.5	1.21	7.94	0.029	0.32	<0.010	0.29

Fonte: (SILVA *et al.*, 2020)

Tabela 4 – Propriedades Térmicas

Material	Densidade (kg/m^3)	Condutividade Térmica ($W/m \cdot K$)	Calor Específico ($J/kg \cdot K$)
304L	$7.97 \cdot 10^3 - 6.01 \cdot 10^{-2} \cdot T - 1.12 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 6.16 \cdot 10^{-0.7} \cdot T^3$	$14.3 - 0,00902 \cdot T + 4.52 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 2,49 \cdot 10^{-8} \cdot T^3$	$276 + 0.851 \cdot T - 8.51 \cdot 10^{-4} T^2 + 3 \cdot 10^{-7} \cdot T^3$
PCBN	3450	100	750

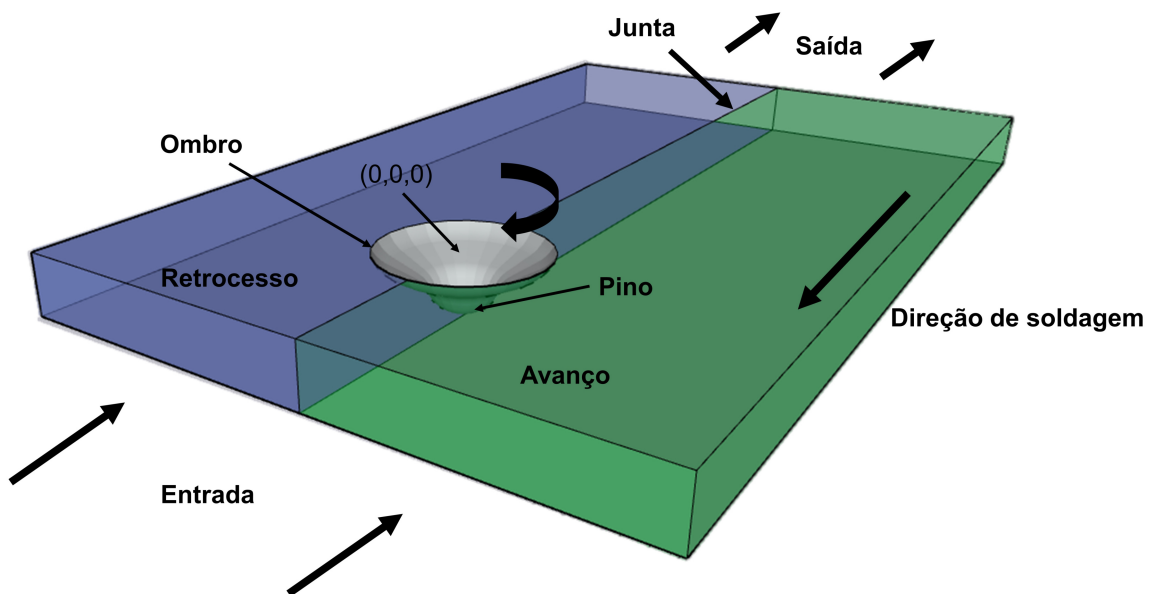
Fonte: (SILVA *et al.*, 2020)

3.2 Metodologia

Neste estudo, a soldagem não foi analisada em toda a sua extensão, o início e o final foram desconsiderados por não serem representativos, analisando-se apenas a seção intermediária. Essa seção tem uma geração de calor constante e a seção transversal da solda tem propriedades geométricas e estruturais semelhantes. Essa semelhança indica um estado estacionário (SONG *et al.*, 2014).

A simulação foi feita em modo estacionário, uma vez que a seção intermediária funciona em estado estacionário. Foi considerado que a ferramenta estava com o ombro penetrado e com o pino com penetração total no material. Os materiais foram considerados fluidos não newtonianos, incompressíveis e visco-plásticos. O eixo das coordenadas foi colocado no centro da ferramenta e no topo da peça de trabalho, como apresentado na Figura 3. A malha foi gerada usando o software Ansys Mesh. Não foi possível refinar localmente na região da peça devido a dificuldades de processamento desse tipo de malha.

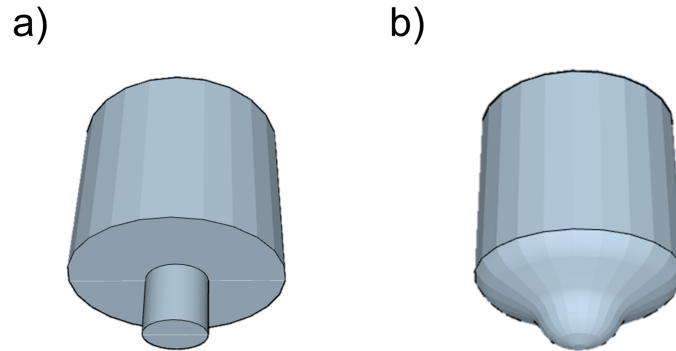
Figura 3 – Esquema de soldagem



Fonte: elaborado pelo autor.

Os testes foram simulados com base no estudo em que a simulação do aço inoxidável AISI 304L foi validada com a ferramenta simplificada por Silva *et al.* (2020) e a geometria da ferramenta junto do modelo matemático utilizado por Silva (2021). Na Figura 4 é possível ver a diferença da configuração de cada uma das ferramentas utilizadas nos trabalhos citados.

Figura 4 – Perfil das ferramentas. a) Ferramenta simplificada (SILVA *et al.*, 2020); b) Ferramenta atualizada (SILVA, 2021)



Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.1 Condições de contorno

Foram utilizados UDFs (User-Defined Functions), que permitem que o usuário modifique parâmetros de simulação por meio de códigos, nesse caso, em linguagem de computação C.

O calor gerado pelo contato entre o ombro e a chapa é definido como:

$$q_1 = [\delta n\tau + (1 - \delta)\mu_f P] (\omega r - U_1 \sin \theta) \quad (3.1)$$

onde, o P é a pressão normal da ferramenta durante a soldagem, ω é a velocidade angular, U_1 é a velocidade de soldagem, η é a eficiência térmica e $(\omega r - U_1 \sin \theta)$ representa a velocidade relativa entre a ferramenta e a chapa. E $\sin \theta$ é definido por:

$$\sin \theta = \frac{y}{r} \quad (3.2)$$

$$\cos \theta = -\frac{x}{r} \quad (3.3)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.4)$$

onde r é a distância ao eixo global fixo no centro da ferramenta.

O calor gerado pelo contato da ferramenta e da peça é dividido entre eles. A fração que é inserida na placa (f) é definida por (NANDAN *et al.*, 2008)

$$f = \frac{J_c}{J_f + J_c} \quad (3.5)$$

onde J_i é definido da seguinte maneira:

$$J_i = \sqrt{\rho C_p k} \quad (3.6)$$

onde $i = c$ ou f para chapa e ferramenta, respectivamente, ρ é a densidade do material, C_p o calor específico e k é a condutividade térmica.

A convecção também foi adotado para as faces da chapa, no topo da chapa foi colocado uma perda de calor por radiação além da convecção. As equações que definem essa perda de calor em cada face como a base, os lados e topo estão abaixo respectivamente (SILVA, 2021):

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = h_b (T - T_e) \quad (3.7)$$

$$\pm k \frac{\partial T}{\partial y} = h_l (T - T_e) \quad (3.8)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = h_f (T - T_e) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_a^4) \quad (3.9)$$

onde h_b , h_l , e h_f são os coeficientes de convecção para a base, os lados e o topo da chapa, respectivamente, T_a é a temperatura ambiente, e k é a condutividade térmica, σ é a constante de Stefan-Boltzman e ε é a emissividade da chapa.

As velocidades presentes no modelo também foram aplicadas ao software Ansys Fluent por UDF. Como a ferramenta real contém ranhuras isso, também foi levado em conta no desenvolvimento dessas equações de velocidade no qual faz com que existam dois comportamentos, uma velocidade radial que é oposta a direção de crescimento do raio da ferramenta, e outra que é uma velocidade vertical que faz com que haja um fluxo em direção a base (SILVA, 2021).

$$v_x = (1 - \delta)(\omega r \sin \theta - U_1) \quad (3.10)$$

$$v_y = (1 - \delta)(\omega r \cos \theta) \quad (3.11)$$

$$v_z = \frac{-0,0254}{rpp} \cdot \omega \quad (3.12)$$

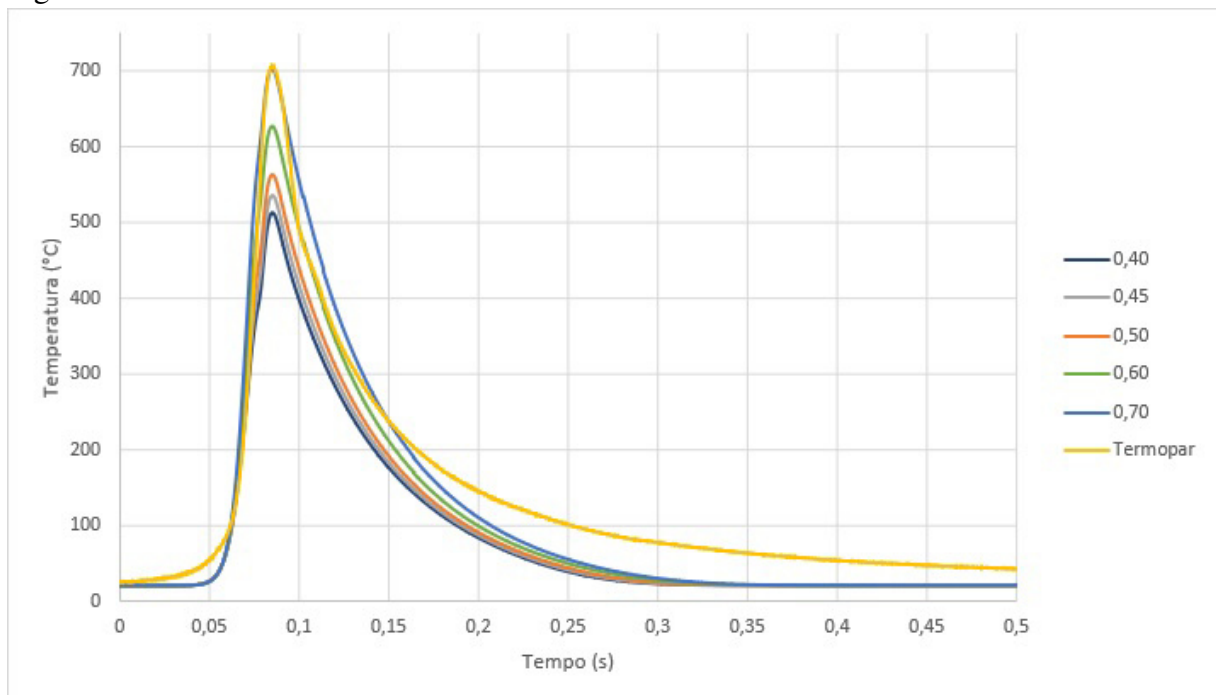
onde R_p é o raio e rpp são as ranhuras por polegada.

Um teste de malha foi realizado para que esta não seja um fator significativo para obtenção de resultados. Foram realizadas simulações com malhas de diferentes tamanhos de elementos, e a malha com o 3.142.400 elementos e 3.547.647 nós foi a que mostrou a partir dela os resultados de temperatura não iriam mais se modificar de forma significativa.

4 RESULTADOS

Durante as simulações foi utilizado um fator de atrito diferente das simulações originais, devido a mudança na geometria da ferramenta. Ao simular com o mesmo coeficiente de atrito com a nova ferramenta, verificou-se um decréscimo na temperatura de pico. Então foi realizado a mesma simulação com diferentes coeficientes de atrito como pode ser visto na Figura 5. Esses novos testes foram comparados com o termopar do lado de avanço na mesma posição do trabalho experimental feito por Caetano (2016).

Figura 5 – Teste de coeficiente de atrito

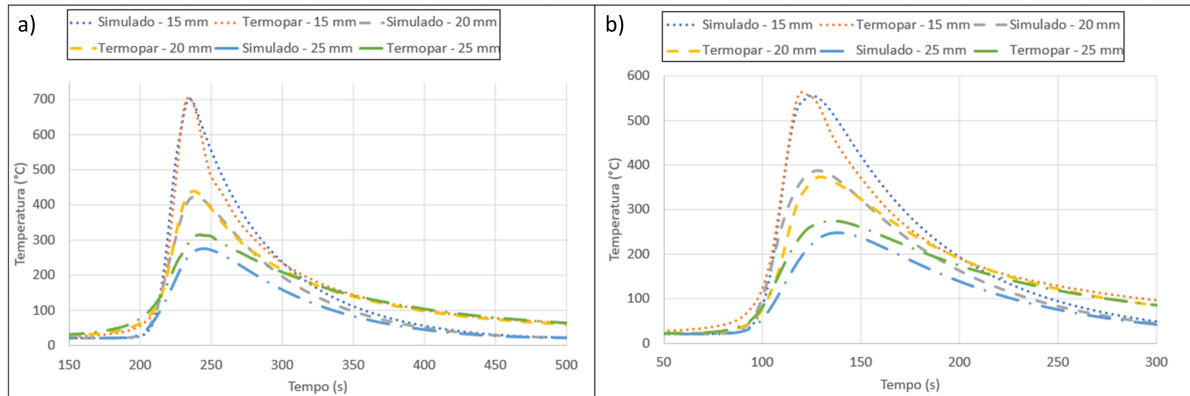


Fonte: elaborado pelo autor.

Então foi utilizado o valor de $\mu = 0,7$, este que coincidiu com a temperatura de pico do termopar.

Na Figura 6 pode-se observar que com esse coeficiente de atrito as temperaturas ficaram semelhantes aos do termopares na prática e com isto é uma evidência que o modelo utilizado está validado.

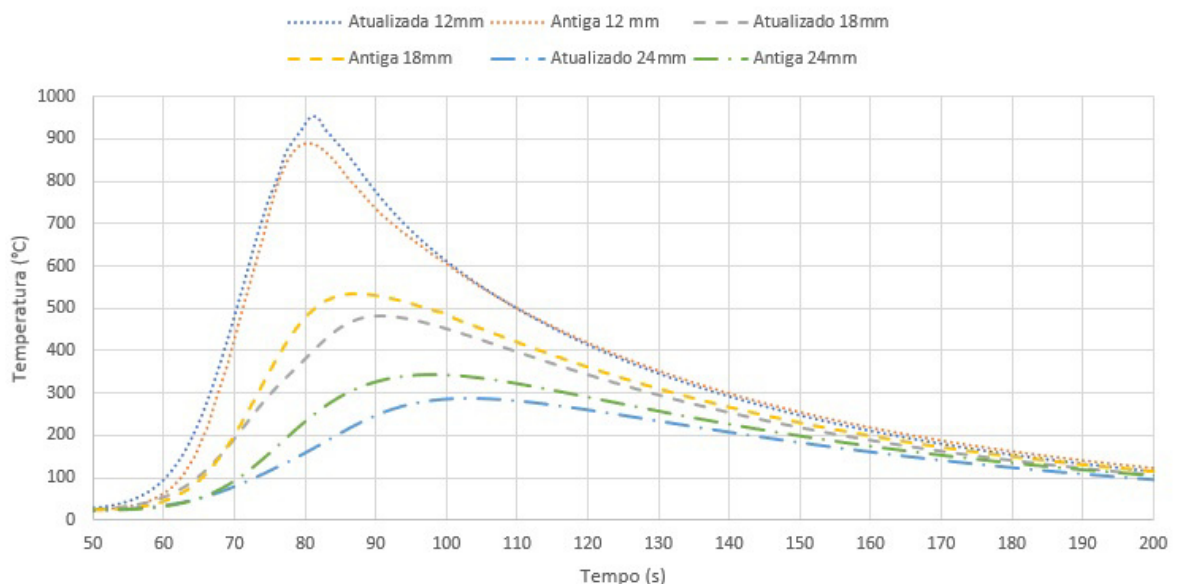
Figura 6 – Comparação dos valores de temperatura do Teste 1 de termopares; a) do lado de avanço com o simulado; b) do lado de retrocesso com o simulado



Fonte: elaborado pelo autor.

Foi coletado, das simulações feitas por Silva *et al.* (2020), três ciclos térmicos respectivos ao Teste 1 no lado de avanço, assim foi possível avaliar o comportamento da mudança de ferramenta em diferentes pontos da geometria, como pode ser visto na Figura 7. O que pode ser analisado é que na região próxima ao ombro, a temperatura teve um pico maior que a ferramenta antiga. Em contrapartida, nas regiões afastas ao ombro, houve uma mudança na disposição dos ciclos térmicos, o da ferramenta mais simplificada obteve maiores temperaturas do que o da ferramenta atualizada.

Figura 7 – Comparação dos valores de ciclo térmico do Teste 1



Fonte: elaborado pelo autor.

Após a realização de cada uma das simulações, foram produzidas imagens contendo o corte da seção transversal à direção de soldagem, ao longo do centro do pino. Os resultados de

temperatura e viscosidade de cada teste foram retirados do software Ansys Fluent e analisados de diferentes maneiras de acordo com os parâmetros utilizados.

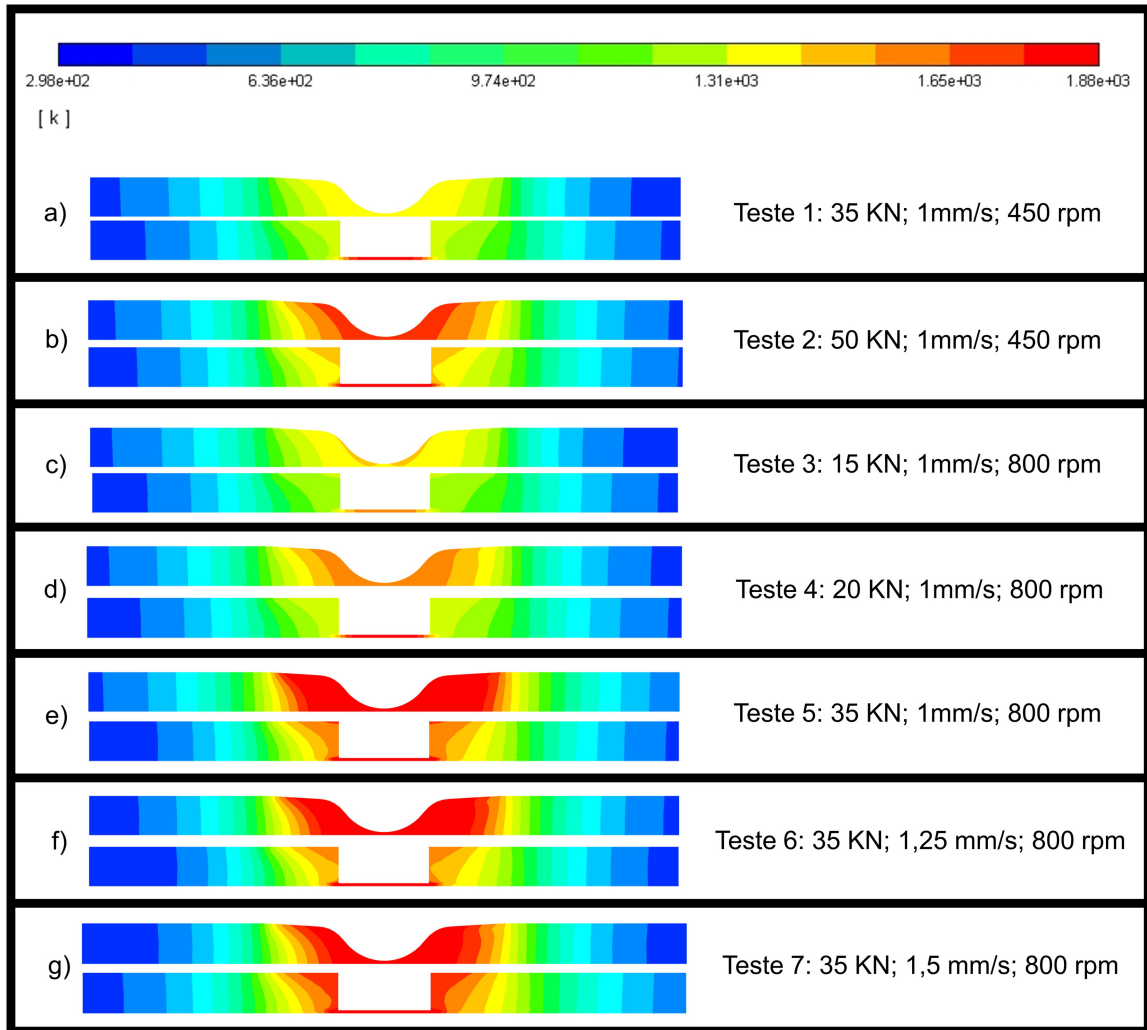
Na Figura 8, foram colocados os planos transversais dos resultados de temperatura simulados, na parte inferior por Silva *et al.* (2020) e na parte superior os planos transversais dos resultados obtidos utilizando o perfil de ferramenta atualizado.

Analisando todos os testes é possível notar que com o novo perfil de ferramenta a temperatura se propagou de forma gradual a partir dela e com um registro de um aumento de temperatura em relação a ferramenta simplificada. A alta temperatura observada nos resultados, principalmente nos testes 2, 5, 6 e 7 não são observadas experimentalmente, isto ocorre na simulação devido a perda de massa que ocorre na prática, como à expulsão de metal na forma de flash, e também a simulação não considera um coeficiente de atrito variável. Esse flash tanto elimina calor pela rejeição de metal superaquecido, quanto sua geometria na forma de pequenas laminas contorcidas atuam como aletas para dissipação do calor. Infelizmente essa perda de massa e troca térmica não é considerada no modelo aplicado neste estudo, resultando em um excedente de calor no resultado da simulação que não deve ser observado na prática.

Essa propagação realizada pela ferramenta nova mostrou que na base do pino, em contraponto das simulações antigas, o calor fornecido a peça não tem uma mudança drástica chegando à temperaturas muito elevadas, como é visto nas Figuras 8a a 8f. Na Figura 8g isso não é evidente devido as altas temperaturas que a peça alcançou nas duas simulações, devido a alta rotação da ferramenta junto com uma velocidade de soldagem elevada, que ao analisarmos a Figura 8a que tem uma rotação de 450 rpm e Figura 8e com uma rotação de 800 rpm, o aumento da temperatura se deu pelo aumento do valor da rotação da peça e ao analisarmos a Figura 8e, 8f e 8g, com velocidade de soldagem 1, 1,25, 1,5 mm/s, respectivamente, esse também é um fator que gera um aumento nos valores de temperatura, ao passo que ele é diminuído, pois na prática a fonte de energia leva mais tempo para percorrer a peça e com isso conduzindo calor por mais tempo em um mesmo local (KIM *et al.*, 2006).

Observando o efeito da força axial nas simulações, foi constatado que com esse perfil atualizado a contribuição da força axial ficou mais evidente do que no perfil antigo como pode ser visto no teste 1 e 2, Figura 8a e b, respectivamente, estes com a força axial 35 e 50 KN, respectivamente, com rotação de 450 rpm e também os testes 3, 4 e 5, Figura 8c, 8d, 8e, estes com a força axial 15, 20 e 35 KN, respectivamente com a rotação de 800 rpm, todos eles com velocidade de soldagem 1 mm/s.

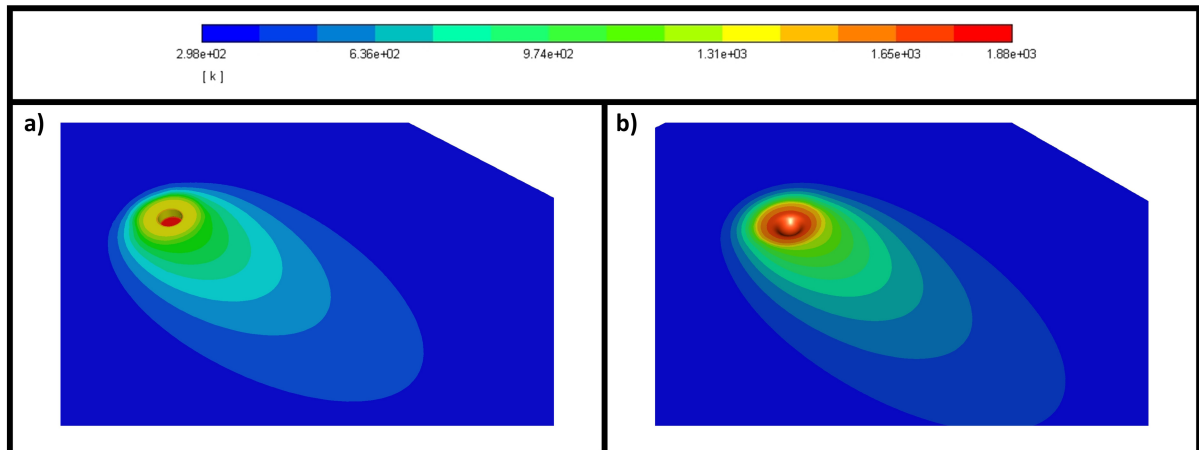
Figura 8 – Perfil de temperatura na transversal do pino novo, superior, em paralelo ao Silva *et al.* (2020), inferior. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3; d) Teste 4; e) Teste 5; f) Teste 6; g) Teste 7



Fonte: elaborado pelo autor.

Nas simulações realizadas por Silva *et al.* (2020), o movimento junto com o atrito causado pelo ombro da ferramenta era o principal agente para fornecer energia para o processo, os lados do pino não tinham participação no processo, devido a não existir uma componente da força axial na orientação dos lados do pino, e a base do pino, devido a estar com a força axial diretamente aplicada na sua região, aquecia o material de cima para baixo, causando uma distribuição de calor de baixo para cima da chapa, enquanto com a ferramenta atualizada, o conjunto da ferramenta fornece a energia e se propaga de maneira gradual. A diferença da propagação do calor gerado na região da ferramenta, entre os dois perfis de ferramenta, pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Comparação da propagação de calor. a) Antiga; b) Nova



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 10, são apresentadas as macrografias da seção transversal de soldas produzidas experimentalmente por Caetano (2016), dos testes 1 a 7. Fazendo essa comparação, do experimental ao que foi simulado com a nova ferramenta junto com os perfis simulados da ferramenta antiga, nas Figuras 10a, 10b, 10c, onde temos evidente nas macrografias defeitos de soldagem na região de mistura no lado do retrocesso, sinalizado por setas vermelhas, temos também analisando o comportamento da viscosidade do material, no perfil novo, para a região do retrocesso, que nesses testes a simulação mostrou que o perfil de viscosidade próximo à área superficial do pino não é uniforme, sinalizado por setas pretas.

Ao comparar os perfis de viscosidade dessa simulações em geral, o perfil da ferramenta antiga apresenta regiões de alta viscosidade na região do topo do pino, região tracejada, algo que na prática não deveria ocorrer devido a alta temperatura, deformação e velocidade nessa região de mistura, enquanto a ferramenta nova apresenta zonas de viscosidades graduais ao longo que vai se distanciando do pino.

Analisando os testes 4 e 5, Figura 10d e 10e, onde temos uma menor presença de defeitos, o perfil de viscosidade se tornou mais uniforme próximo a região da parede do pino, na ferramenta nova. Em comparação, observa-se que não há uma uniformidade da viscosidade na região próxima ao pino nas simulações com a ferramenta com pino cilíndrico.

Nos testes 5,6 e 7, Figuras 10e, 10f e 10g, respectivamente, observa-se uma região com baixa viscosidade maior do que nos outros testes, isto devido a alta rotação aplicada pela ferramenta que fez com que o material chegasse a altas temperaturas, deixando-o com uma viscosidade baixa nessa região próxima ao pino.

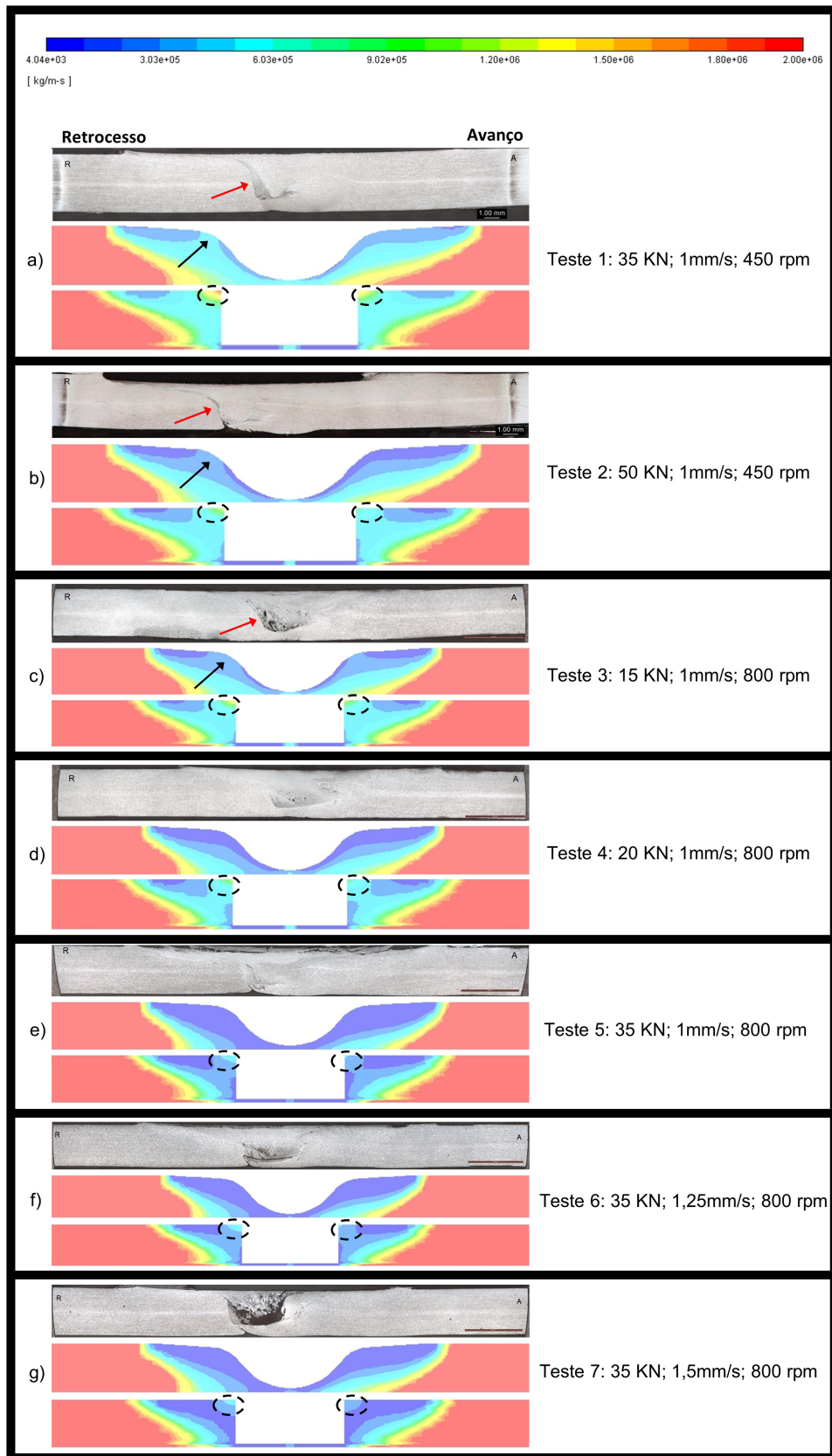
Analisando a Figura 10e, na região de mistura ela não apresentou grandes defeitos

como as Figuras 10f e 10g, mas apresentou rebarbas, um tipo de defeito que acontece devido ao material mais fluido se desprender por entre as paredes da ferramenta e se espalhar na superfície da chapa, devido a alta rotação e baixa velocidade de soldagem (KIM *et al.*, 2006).

Com o aumento da velocidade de soldagem nos testes 6 e 7, Figura 10f e 10g, respectivamente, eles não apresentaram as rebarbas, vistas no teste 5, mas sim uma falta de preenchimento na zona de mistura, que foi intensificada com a alta velocidade de soldagem do teste 7. No processo FSW o aumento da velocidade de soldagem pode acarretar na falta de preenchimento na zona de mistura do material, pois a alta velocidade com que a ferramenta translada sobre o material não a permite realizar a mistura de forma efetiva, uma vez que o material está sujeito a uma baixa viscosidade (KIM *et al.*, 2006).

Não houve uma diferença significativa nas áreas de viscosidade entre os testes 5, 6 e 7. Mas houve uma pequena diminuição das regiões de baixa viscosidade, de acordo com que a velocidade de soldagem aumenta.

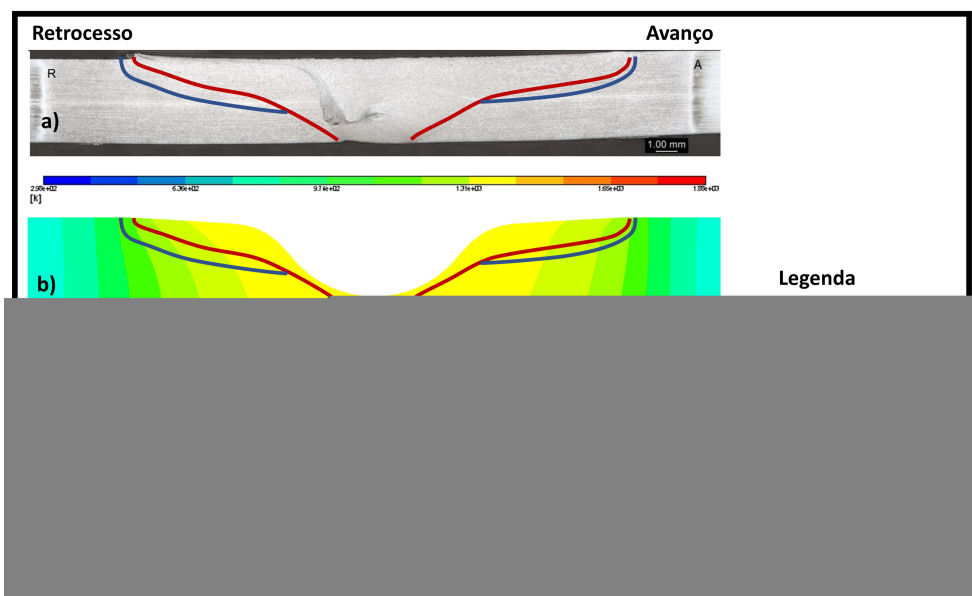
Figura 10 – Comparativo da macrografia com o perfil de viscosidade na transversal do pino. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3; d) Teste 4; e) Teste 5; Teste 6; Teste 7



Fonte: elaborado pelo autor.

Um dos objetivos de se simular processos de soldagem é identificar, de acordo com os resultados obtidos as zonas de soldagem, pois estas têm grande influência nas propriedades que os materiais vão possuir ao final do processo. Na Figura 11, é demonstrado a análise feita para se tentar identificar essas zonas de soldagem. A zona de mistura, identificada pela linha de cor vermelha, é uma região de menor viscosidade e maior velocidade, no Ansys Fluent é possível observar as linhas de contorno de viscosidade, com isso foi traçado uma linha vermelha dentro da região que correspondia ao menor valor de viscosidade que se encontra nessa região de baixa viscosidade próxima a área superficial do pino, uma nova imagem do perfil de viscosidade foi realizada para a melhor visualização da zona de menor viscosidade. A zona afetada pelo calor (ZAC), é a região que sofreu apenas a influência da temperatura. Para este processo esta zona começa a partir quando não há mais movimento de material, ou seja, velocidade de movimento igual a 0 m/s, identificada pela cor azul escuro. A zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA) é a região próxima a zona de mistura que sofre influência do calor e uma menor deformação. Neste caso, ela é a região entre a linha vermelha e a linha azul escuro. Estas análises foram realizadas tendo como base somente os resultados simulados.

Figura 11 – Análise das zonas de soldagem do Teste 1. a) Macrografia; b) Temperatura; c) Viscosidade; d) Velocidade

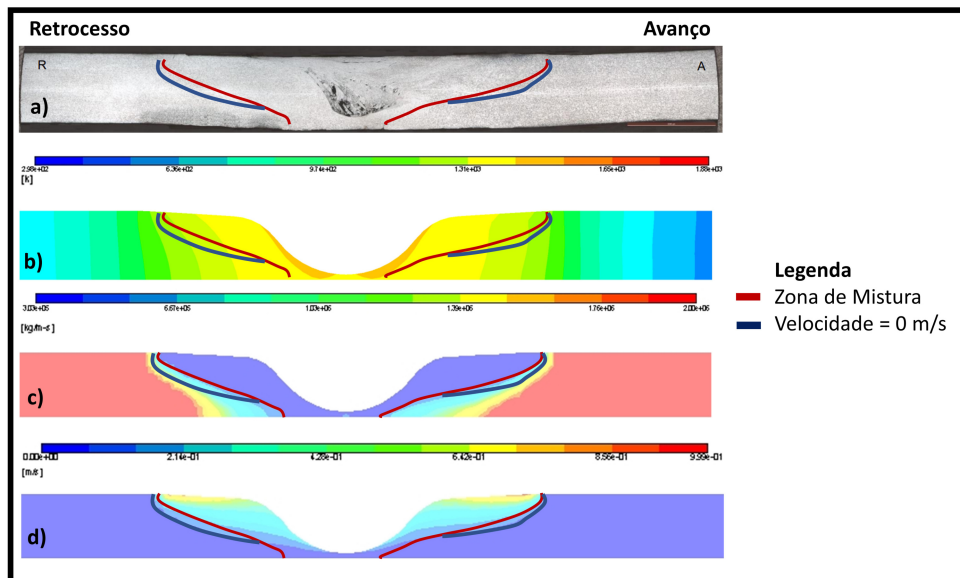


Fonte: elaborado pelo autor.

Os testes 3 e 4, Figuras 12 e 13, respectivamente, foram analisados por não apresentarem valores de temperatura elevados. Ao comparar as suas regiões, percebe-se uma maior zona de mistura no teste 4, este que por sua vez apresenta um valor de temperatura maior em comparação ao teste 3, mas também apresenta uma menor ZTMA, possivelmente devido ao

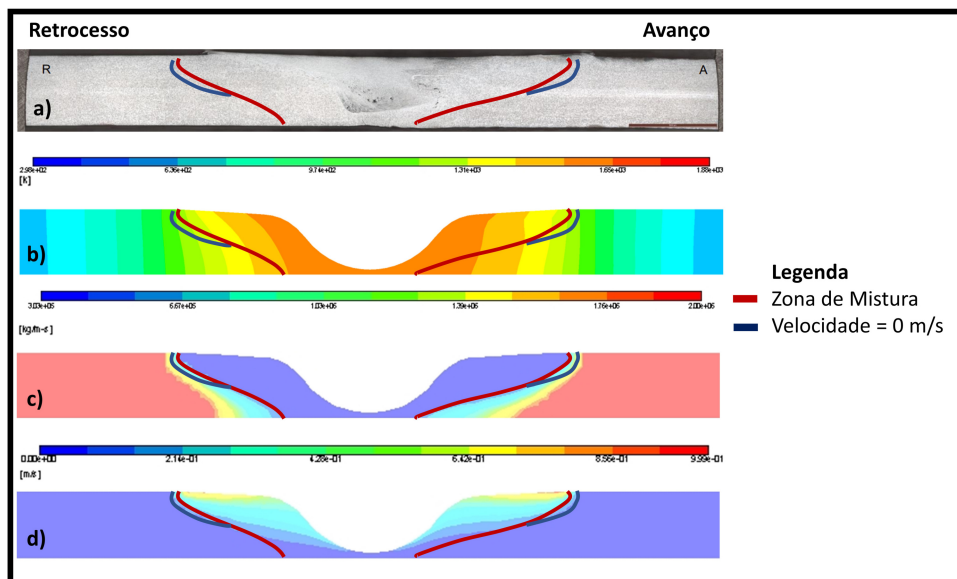
alto gradiente de temperatura que esse material sofreu e com isso seu resfriamento ocorre mais rápido, fazendo com que a viscosidade aumente, diminuindo assim a região que ainda ocorre algum tipo de deformação.

Figura 12 – Análise das zonas de soldagem do Teste 3. a) Macrografia; b) Temperatura; c) Viscosidade; d) Velocidade



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 13 – Análise das zonas de soldagem do Teste 4. a) Macrografia; b) Temperatura; c) Viscosidade; d) Velocidade



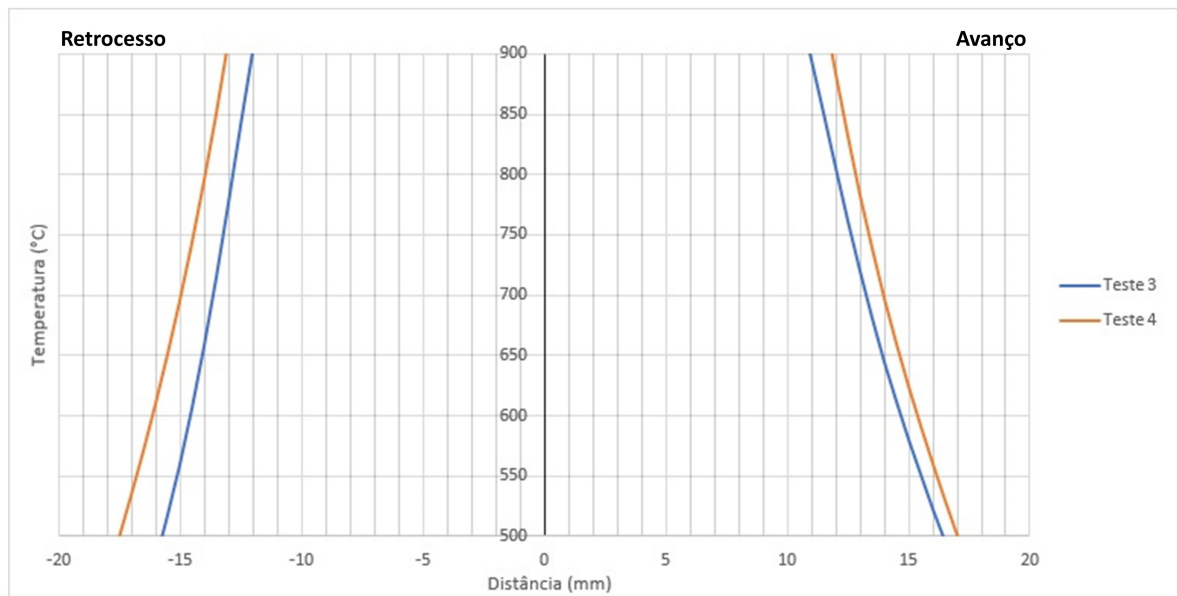
Fonte: elaborado pelo autor.

outra análise realizada neste estudo foi a determinação da repartição térmica que compreende as temperaturas limites para a precipitação de carbonetos no aço inoxidável austení-

tico AISI 304L. Foi assumido como faixa de temperatura crítica para este tipo de precipitação, as temperaturas de 500 a 900°C. Na Figura 14, está identificado os testes 3 e 4, no lado de avanço e lado de retrocesso, na ZAC do material em que há o aquecimento dentro dessa faixa de temperatura crítica. Com este gráfico é possível estimar a distância da zona crítica no lado de retrocesso e avanço para os dois testes.

O teste 3 apresentou uma menor região crítica de, aproximadamente, 4 mm, enquanto o teste 4 apresentou, aproximadamente, 4,5 mm no lado de retrocesso. Já no lado de avanço do material o teste 3 apresentou uma região crítica de, aproximadamente, 5,5 mm, enquanto o teste 4 apresentou uma região crítica de, aproximadamente, 5 mm. O maior aporte térmico do teste 4 fez com que sua região crítica ficasse em torno de 5 mm mais afastada da zona de mistura do que o teste 3.

Figura 14 – Análise da região de precipitação. a) Teste 3; b) Teste 4



Fonte: elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi avaliado como a mudança da ferramenta de FSW, altera os resultados de uma mesma simulação, com os mesmos parâmetros no material aço austenítico AISI 304L, simulados do Fluent.

Foi verificada a necessidade de uma mudança nas condições de simulação, como por exemplo, a fator de atrito, devido à mudança da ferramenta.

Foi possível validar o modelo com a ferramenta atualizada devido a comparação com os valores de termopares de uma soldagem experimental por FSW com os mesmos materiais e parâmetros de soldagem.

Foi possível verificar que a mudança na ferramenta mostrou resultados com uma discrepância maior no modo como a temperatura é dissipada na peça em relação ao modelo mais simplificado, mostrando inclusive que existiam pontos na simulação com o perfil antigo que chegavam a temperaturas elevadas sem uma elevação gradual da temperatura e com o perfil novo a temperatura se mostrou gradual e com uma propagação uniforme.

O comportamento da viscosidade obtido pela simulação numérica indicou alterações no lado de retrocesso que podem estar relacionadas com a ausência um fluxo uniforme, que conduz aos defeitos observados experimentalmente. Também foi observado uma diferença no comportamento da viscosidade entre a ferramenta nova e a antiga, no qual a nova geometria apresenta um perfil gradual e uniforme, enquanto a antiga não tem uma uniformidade, principalmente na região de interface entre o pino e o ombro.

Foi estimada a extensão da faixa da crítica para a ZAC do aço AISI 304L na qual os precipitados de carbonetos podem ocorrer.

REFERÊNCIAS

- BAKKIYARAJ, M.; BERNARD, S. S.; SAIKRISHNAN, G.; GURUYOGESH, S.; GURUPRASANNA, T.; DINESHKUMAR, K. Effect of tool offset condition on mechanical and metallurgical properties of fsw dissimilar al-cu joint. **Materials Today: Proceedings**, 2020. ISSN 2214-7853. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320350100>.
- BASHEER, U.; NOOR, A. F. M.; ZUHAILAWATI, H.; ISMAIL, A. Advances in friction welding process: A review. **Science and Technology of Welding Joining**, v. 15, p. 534–558, 10 2010.
- CAETANO, G. d. Q. **Soldagem similar de aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos pelo processo “friction stir welding”**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Fortaleza, 2016.
- CARREON, C. A. H.; FERRER, V.; MANCILLA, J.; MARTÍNEZ, C. Three-dimensional numerical modeling of the friction stir welding of dissimilar steels. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 93, p. 1–15, 11 2017.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, Principais tipos**. Associação Brasileira de Metais, 2002. ISBN 9788586778483. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=LoL\GwAACAAJ>.
- CHO, H. H.; HONG, S. T.; ROH, J. H.; CHOI, H. S.; KANG, S. H.; STEEL, R. J.; HAN, H. N. Three-dimensional numerical and experimental investigation on friction stir welding processes of ferritic stainless steel. **Acta Materialia**, v. 61, n. 7, p. 2649–2661, 2013. ISSN 13596454.
- DAVIS, J. (Ed.). **ASM Specialty Handbook: Stainless Steels**. [S. l.]: ASM International, 1994. 576 p.
- FRIGAARD, Ø.; GRONG, Ø.; MIDLING, O. T. A process model for friction stir welding of age hardening aluminum alloys. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 32, n. 5, p. 1189–1200, 2001. ISSN 1073-5623.
- GIBSON, B.; LAMMLEIN, D.; PRATER, T.; LONGHURST, W.; COX, C.; BALLUN, M.; DHARMARAJ, K.; COOK, G.; STRAUSS, A. Friction stir welding: Process, automation, and control. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 16, n. 1, p. 56–73, 2014. ISSN 1526-6125. Recent Developments in Welding Processes. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612513000601>.
- HERMENEGILDO, T.; SILVA, A. Santos da; TORRES, E.; SANTOS, T. F. A.; RAMIREZ, A. Desenvolvimento dos parâmetros do processo de soldagem por atrito com pino não consumível para o aço de alta resistência e baixa liga iso 3183 x80m. **Soldagem Inspeção**, v. 22, p. 129–138, 06 2017.
- JABRAEILI, R.; JAFARIAN, H. R.; KHAJE, R.; PARK, N.; KIM, Y.; HEIDARZADEH, A.; EIVANI, A. R. Effect of fsw process parameters on microstructure and mechanical properties of the dissimilar aa2024 al alloy and 304 stainless steel joints. **Materials Science and Engineering: A**, p. 140981, 2021. ISSN 0921-5093. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509321002501>.

KIM, Y.; FUJII, H.; TSUMURA, T.; KOMAZAKI, T.; NAKATA, K. Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy. **Materials Science and Engineering: A**, v. 415, n. 1, p. 250–254, 2006. ISSN 0921-5093. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509305011652>.

LIN, P.-C.; PAN, J.; PAN, T. Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 6111-t4 sheets. part 1: Welds made by a concave tool. **International Journal of Fatigue**, v. 30, n. 1, p. 74–89, 2008. ISSN 0142-1123. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112307000692>.

LIN, P.-C.; PAN, J.; PAN, T. Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 6111-t4 sheets. part 2: Welds made by a flat tool. **International Journal of Fatigue**, v. 30, n. 1, p. 90–105, 2008. ISSN 0142-1123. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112307000710>.

LIPPOLD, J.; KOTECKI, D. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**. Wiley, 2005. ISBN 9780471473794. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=__NTAAAAMAAJ.

MAHTO, R. P.; KUMAR, R.; PAL, S. K. Characterizations of weld defects, intermetallic compounds and mechanical properties of friction stir lap welded dissimilar alloys. **Materials Characterization**, v. 160, p. 110115, 2020. ISSN 1044-5803. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580319322648>.

MISHRA, R.; DE, P.; KUMAR, N. **Friction Stir Welding and Processing: Science and Engineering**. [S. l.: s. n.], 2014. ISBN 978-3-319-07042-1.

NANDAN, R.; LIENERT, T. J.; DEBROY, T. Toward reliable calculations of heat and plastic flow during friction stir welding of Ti-6Al-4V alloy. **International Journal of Materials Research**, v. 99, n. 4, p. 434–444, apr 2008. ISSN 1862-5282.

NANDAN, R.; ROY, G. G.; DEBROY, T. Numerical Simulation of Three-Dimensional Heat Transfer and Plastic Flow During Friction Stir Welding. **Metallurgical and Materials Transactions**, v. 37A, n. 4, p. 1247–1259, 2006. ISSN 1073-5623.

NANDAN, R.; ROY, G. G.; LIENERT, T. J.; DEBROY, T. Numerical modelling of 3D plastic flow and heat transfer during friction stir welding of stainless steel. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 11, n. 5, p. 526–537, 2006. ISSN 1362-1718.

PADILHA, A.; RIOS, P. Decomposition of austenite in austenitic stainless steels. **Isij International - ISIJ INT**, v. 42, p. 325–327, 01 2002.

PADMANABAN, G.; BALASUBRAMANIAN, V. Selection of fsw tool pin profile, shoulder diameter and material for joining az31b magnesium alloy – an experimental approach. **Materials Design**, v. 30, n. 7, p. 2647–2656, 2009. ISSN 0261-3069. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306908005347>.

SEIDEL, T. U.; REYNOLDS, A. P. Two-dimensional friction stir welding process model based on fluid mechanics. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 8, n. 3, p. 175–183, 2003. ISSN 1362-1718.

SILVA, Y. C.; JÚNIOR, F. J. O.; SANTOS, J. F. dos; MARCONDES, F.; SILVA, C. Numerical investigation of the influence of FSW parameters on the heat and mass transfer of austenitic stainless steels. **Welding in the World**, 2020. ISSN 18786669.

SILVA, Y. C. da. **Modeling and simulating of stainless steel joints by the Friction stir welding**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Fortaleza, 2021.

SMITH, W. F. **Structure and Properties of Engineering Alloys**. 2nd edition. ed. New York: McGraw-Hill, 1993.

SONG, K. J.; DONG, Z. B.; FANG, K.; ZHAN, X. H.; WEI, Y. H. Cellular automaton modelling of dynamic recrystallisation microstructure evolution during friction stir welding of titanium alloy. **Materials Science and Technology**, v. 30, n. 6, p. 700–711, 2014. ISSN 0267-0836.

SONI, N.; CHANDRASHEKHAR, S.; KUMAR, A.; CHARY, V. Defects formation during friction stir welding: A review. **International Journal of Engineering and Management Research**, v. 7, p. 121–125, 2017.

SUNNAPU, C.; KOLLI, M. Tool shoulder and pin geometry's effect on friction stir welding: A study of literature. **Materials Today: Proceedings**, 2020. ISSN 2214-7853. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320342048>.

SWITZNER, N.; SAWYER, E.; EVERHART, W.; HANLIN, R. Predicting microstructure and strength for aisi 304l stainless steel forgings. **Materials Science and Engineering: A**, v. 745, p. 474 – 483, 2019. ISSN 0921-5093. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509318317337>.

THOMAS, W. M. W.; NORRIS, I.; NICHOLAS, E. D.; NEEDHAM, J. C.; MURCH, M. G.; TEMPLE-SMITH, P.; DAWES, C. J. **Friction stir welding process developments and variant techniques**. 1991. 1–21 p.

ULYSSE, P. Three-dimensional modeling of the friction stir-welding process. **Int. J. Machine tools & Manufacture**, v. 42, n. July, p. 1549–1557, 2002. ISSN 0890-6955.

Venkat Ramana, G.; YELAMASETTI, B.; Vishnu Vardhan, T. Effect of fsw process parameters and tool profile on mechanical properties of aa 5082 and aa 6061 welds. **Materials Today: Proceedings**, 2021. ISSN 2214-7853. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532040519X>.

ZHU, Y.; CHEN, G.; CHEN, Q.; ZHANG, G.; SHI, Q. Simulation of material plastic flow driven by non-uniform friction force during friction stir welding and related defect prediction. **Materials Design**, v. 108, p. 400 – 410, 2016. ISSN 0264-1275. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127516308814>.