

## CARACTERIZAÇÃO DE JUNTAS DISSIMILARES SOLDADAS POR FRICÇÃO UTILIZANDO UMA FRESADORA FERRAMENTEIRA

Daniel da Silva Motta, [daniel.motta@cimatec.fieb.org.br](mailto:daniel.motta@cimatec.fieb.org.br) <sup>1</sup>

Antônio José Mendonça Ferreira, [antonio.mendonca@cimatec.fieb.org.br](mailto:antonio.mendonca@cimatec.fieb.org.br) <sup>2</sup>

Raphael Felix Rezende, [raphael.rezende@cimatec.fieb.org.br](mailto:raphael.rezende@cimatec.fieb.org.br) <sup>3</sup>

<sup>1, 2 e 3</sup> SENAI CIMATEC – Av. Orlando Gomes, 1845 – Piatã CEP 41650-010, Salvador, Bahia, Brasil

**Resumo:** O processo de soldagem por fricção é uma técnica de união de materiais no estado sólido que utiliza o atrito e a pressão entre duas peças com movimento relativo. Este trabalho apresenta uma investigação sobre a aplicação deste processo para união de juntas dissimilares (aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável 304), por meio da soldagem por arraste contínuo não inercial. O desenvolvimento da parte experimental foi realizado no SENAI CIMATEC, utilizando uma fresadora ferramenteira, com rotação constante, para união de peças com seções transversais circulares cheias. Os principais parâmetros variados durante o experimento foram: (a) posição dos materiais - fixo ou móvel e (b) tempo do processo de soldagem. A junta soldada foi caracterizada basicamente por macrografia. Os resultados obtidos demonstram a viabilidade de uso da fresadora para este processo, contudo deixa evidente suas limitações e a influência dos parâmetros de soldagem na qualidade da solda.

**Palavras-chave:** Soldagem por fricção, Juntas dissimilares, Fresadora ferramenteira

### 1. INTRODUÇÃO

A competitividade industrial vem mobilizando engenheiros e cientistas, a fim de obter produtos com elevados padrões de qualidade a baixos custos. Com este pensamento, processos de fabricação não convencionais vêm sendo cada vez mais estudados no sentido de otimizar a fabricação de produtos soldados onde os processos convencionais tornam-se menos econômicos.

O processo de soldagem por fricção também chamado por alguns autores como soldagem por atrito, vem sendo aplicado para a soldagem de tubos de materiais dissimilares, especialmente na indústria automotiva (Martins, 2004).

Esse processo utiliza a transformação de energia mecânica em calor, gerado através do atrito entre as superfícies que serão unidas. A soldagem ocorre em altas temperaturas, mas na fase sólida, e é obtido então, por pressão e escoamento plástico dos materiais envolvidos. Nessa operação, as impurezas são expelidas das superfícies juntamente com o metal que flui, formando um recalque (excesso) em torno da peça (Wainer, 2005).

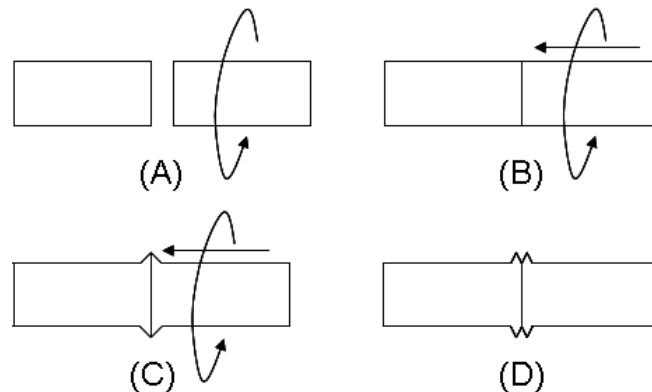
O desenvolvimento deste processo foi introduzido na União Soviética, em 1956, em 1966 foram feitas inovações de tal maneira que o processo foi modificado e patenteado pelos Estados Unidos. Devido a essas patentes existem duas variantes do processo, cuja diferença está no modo de geração da energia: a soldagem por atrito convencional (russa) e a soldagem por atrito inercial (americana) (Machado, 2007; Wainer, 2005).

Segundo Appel, a soldagem por fricção é, em princípio, adequada para a produção de juntas dissimilares que não podem ser obtidas por outros processos de soldagem. A soldagem por fricção convencional produz uniões mistas na forma de juntas de topo com superfícies frontais planas, geralmente envolvendo seções transversais circulares ocas ou cheias. Contudo, sua aplicação é restrita a pares definidos de materiais, como, por exemplo, juntas dissimilares entre aço/alumínio fundido, aço carbono/aço inoxidáveis, níquel/aço inoxidáveis, aço/compósitos e a uniões envolvendo diferentes dimensões no ponto de união.

A soldagem por fricção trata-se de uma soldagem no estado sólido, abaixo do ponto de fusão dos materiais que serão unidos e essa ligação é gerada mecanicamente. Esse aquecimento é devido à rotação de uma das partes mantidas sob pressão contra a outra, que está fixa. A soldagem é feita em poucos segundos, e a solda apresenta características mecânicas e metalúrgicas superiores a, pelo menos, um dos metais que constituem o conjunto soldado, além de oferecer uma zona afetada pelo calor relativamente

estreita que será influenciada diretamente em função do tempo de soldagem e da velocidade de rotação (Paiva, 2009; Wainer 2005).

A figura 1 apresenta as etapas características da soldagem por fricção: (A) Pelo menos uma das peças sofre rotação; (B) As superfícies são aproximadas, se atritam e a energia gerada as leva ao estado plástico; (C) As peças são pressionadas uma contra a outra; (D) Operação concluída (Machado, I. G., 1996).



**Figura 1. Processo soldagem por fricção (fonte: Machado, I. G., 1996)**

No caso da variante convencional, a duração de aquecimento deve ser controlada, ou pelo tempo ou pelo deslocamento. Um aquecimento excessivo pode diminuir a produtividade e aumentar o consumo de material. Além disso, um aquecimento irregular pode gerar inclusões e regiões não unidas na superfície da solda (Machado, I. G., 1996).

Este trabalho tem como proposta investigar a aplicação do processo de soldagem por fricção para união de juntas dissimilares (aço carbono 1020 com aço inoxidável 304), por meio da soldagem por arraste contínuo não inercial.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Material

Para o desenvolvimento da parte experimental, foram utilizadas peças (aço carbono ABNT 1020 e aço inoxidável 304) com seções transversais circulares cheias, com 19 mm de diâmetro. Uma das limitações deste processo é que as peças devem apresentar geometria compatível com as características do processo. Peças com geometrias não circulares precisam de equipamento especial para serem soldadas. O diâmetro de 19 mm foi escolhido para que este trabalho possa ser comparado com estudos já realizados por outros autores.



**Figura 2. Peças usadas no experimento**

### 2.2. Equipamento

O processo de soldagem por fricção requer um equipamento rígido e resistente para manter o alinhamento entre as peças, quando estas estiverem sob pressão, além de manter a rotação durante o processo, mesmo sob condições de torque extremo, e interromper o mesmo quando solicitado.

Neste trabalho, o equipamento utilizado nos experimentos foi uma Fresadora Ferramenteira Diplomat com potência de 5 CV e diâmetro do mandril de 1".



**Figura 3. Fresadora utilizadas nos experimentos**

### 2.3. Parâmetros dos Experimentos

Os experimentos foram realizados nas instalações do SENAI CIMATEC. Alguns parâmetros foram monitorados e permaneceram constantes durante os experimentos, de modo a garantir a validação das comparações entre as amostras. Foram eles:

- Geometria e alinhamento entre as peças (aço carbono ABNT 1020 e aço inoxidável 304).
- Pressão durante a fase de atrito entre as peças, também chamada de pressão de aquecimento.
- Pressão durante a fase de forjamento, após a interrupção da rotação.
- Rotação de 3000 RPM (este valor foi escolhido para que este trabalho possa ser comparado com estudos já realizados por outros autores).

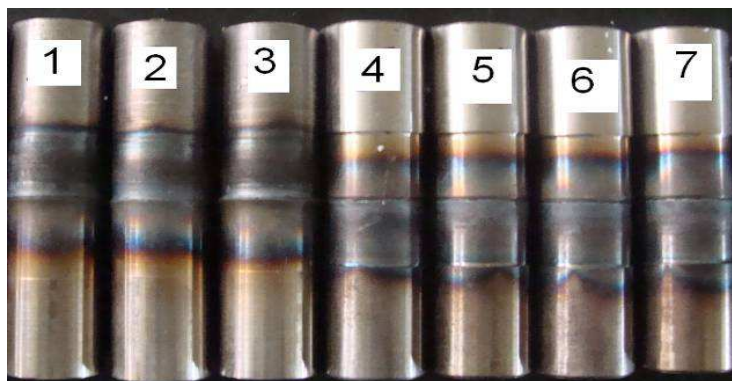
Cabe ressaltar que a pressão real aplicada nas peças não foi medida de forma precisa, e chegou a valores inferiores aos já estudados por outros autores. Durante os experimentos, constatou-se que o aumento de pressão pode levar a fresadora ferramenteira a interromper a rotação antes da deformação plástica ideal para união entre as peças.

Os parâmetros variados e monitorados durante o experimento foram: (a) posição dos materiais - fixo ou móvel e b) tempo do processo de soldagem, conforme detalhado na tabela 1.

**Tabela 1. Parâmetros de soldagem para o processo de fricção**

	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6	Exp 7
<b>Posição:</b>	Inox (F)	Inox (F)	Inox (F)	1020 (F)	1020 (F)	1020 (F)	1020 (F)
<b>Tempo (s):</b>	60	70	80	50	60	70	80
Aquecimento (80%):	48	56	64	40	48	56	64
Forjamento (20%):	12	14	16	10	12	14	16
<b>Rotação (rpm):</b>	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000

Não faz parte deste estudo a avaliação da qualidade da solda em relação às características de resistência mecânica da peça resultante dos experimentos. Na figura 4, pode-se verificar as peças obtidas após o experimento.



**Figura 4. Peças do experimento após processo de soldagem por fricção**

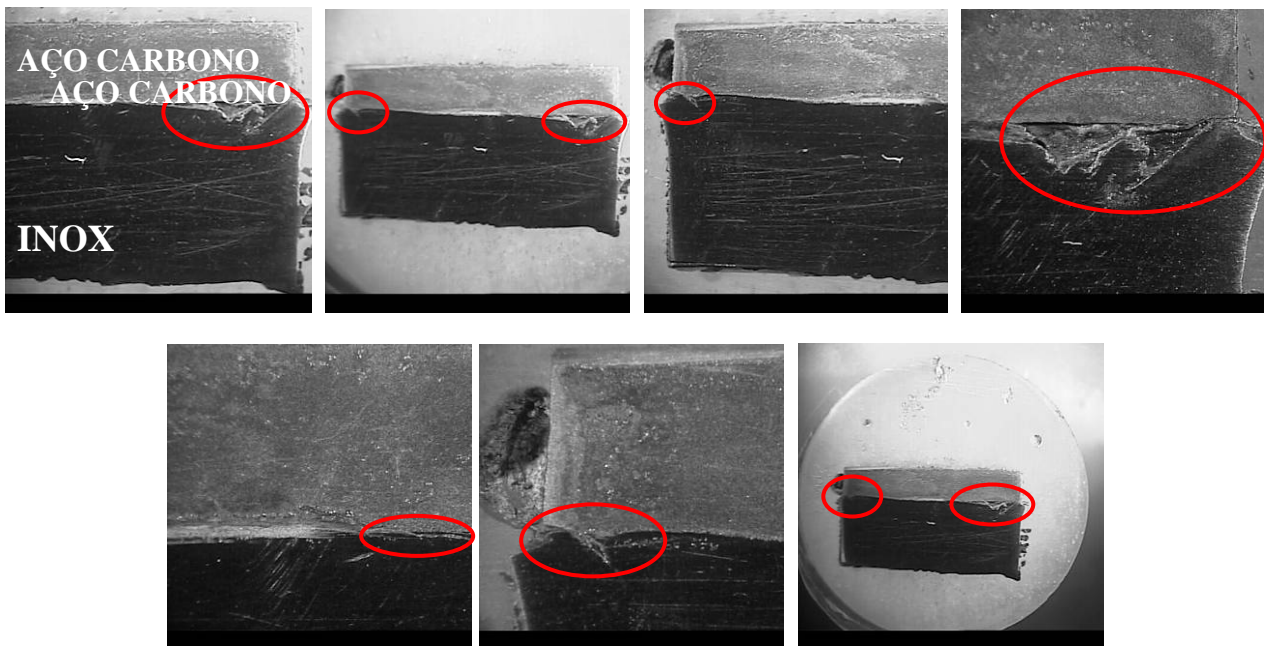
### 3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 3.1. Análise Metalográfica

O ensaio consistiu-se do exame do aspecto das superfícies soldadas, as quais foram seccionadas dos corpos de prova de cada experimento, as mesmas foram devidamente polidas e atacadas por um reagente adequado (ver imagens abaixo das regiões analisadas).

Por meio do ensaio, teve-se uma idéia do conjunto referente à homogeneidade da união soldada, e/ou à distribuição e natureza de possíveis falhas proveniente do processo de soldagem por atrito. A escolha e localização das áreas a serem estudadas, foram guiadas, pelas formas das peças e pelo principal dado que se queria obter (falta de fusão). Com isso foram feitos cortes transversais nas amostras, permitindo assim a visualização das áreas de estudo (os cortes foram feitos utilizando uma cut-off).

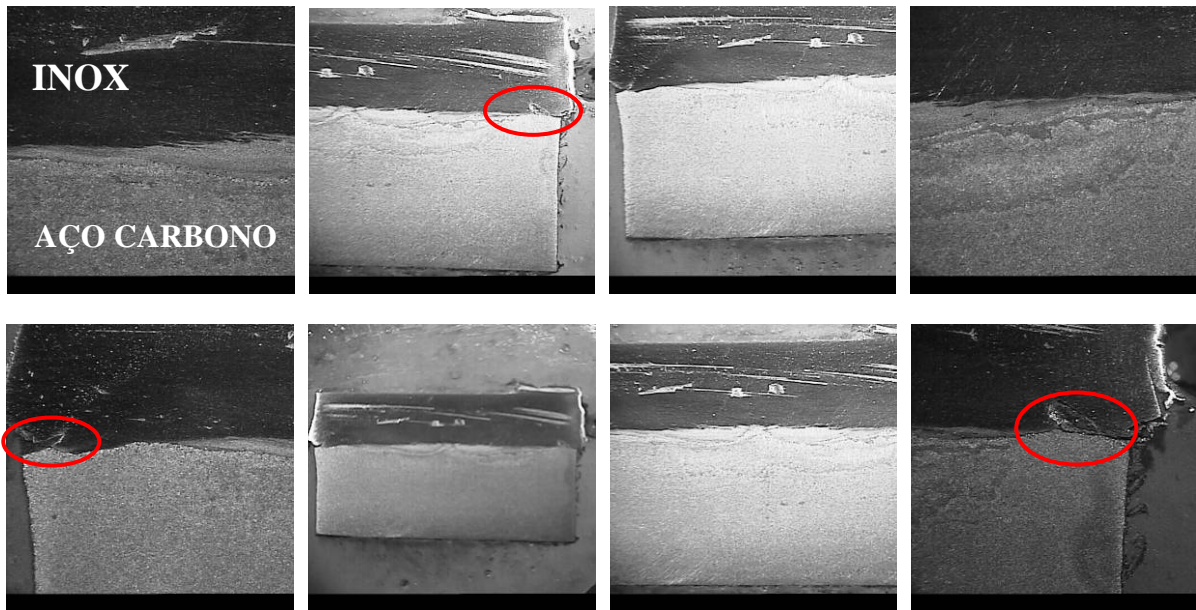
Para evidenciar outras heterogeneidades, foi indispensável proceder-se um ataque químico comparativo. De acordo com os materiais (aço carbono ABNT 1020 e o aço inoxidável AISI 304) e com a finalidade do exame, foi selecionado o reativo Nital a 5,5% (ácido nítrico 5,5% e água 94,5%). O ataque foi feito agitando-se a superfície polida mergulhada no reativo posto numa pequena cuba. A duração do ataque depende da concentração de reativo e da natureza e textura da amostra. Neste caso, a duração do ataque para os aços em estudo foi de 5 a 15 segundos. Após o ataque lavou-se imediatamente a superfície atacada com álcool, e em seguida efetuou-se a secagem, primeiramente com um pequeno chumaço de algodão umedecido com álcool e depois impelindo um jato de ar quente sobre a superfície atacada, o resultado desta etapa é visto nas figuras 5 a 11.



**Figura 5. Análise metalográfica do experimento 1 (Inox fixo; tempo 60s)**

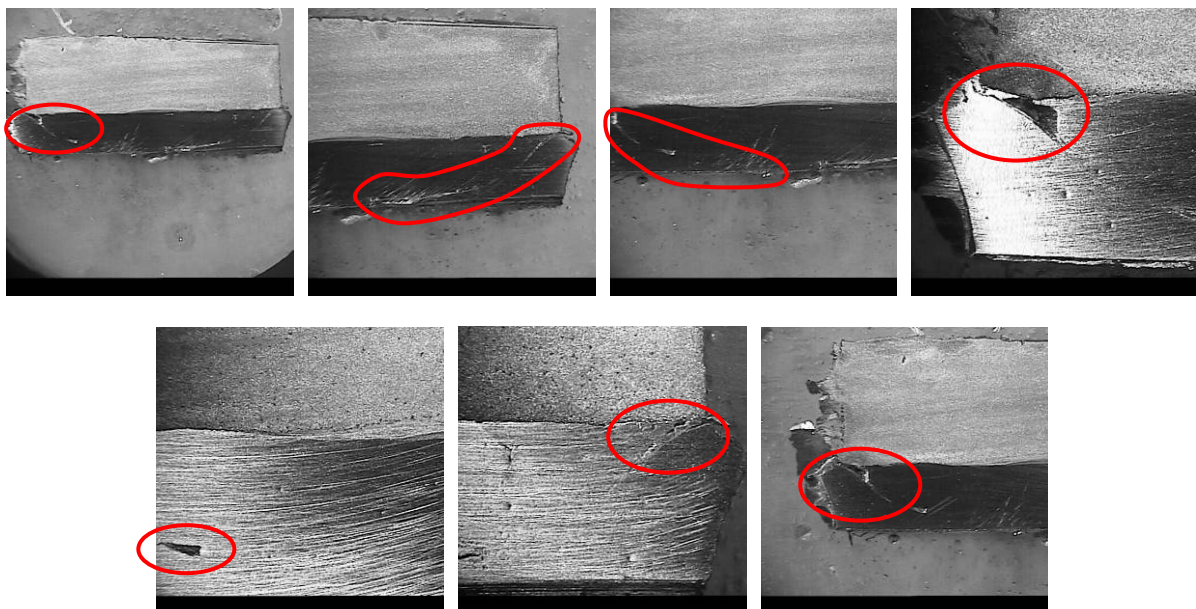
A análise metalográfica do experimento 1 demonstra que houve união entre as partes soldadas, porém trincas e/ou vazios surgiram na peça. Estas trincas podem estar relacionadas com cisalhamento na região plástica, tempo de soldagem baixo, ou baixa pressão exercida durante o procedimento que, com isso, impediu que os óxidos e contaminantes internos fossem expelidos para a superfície durante a união das peças. As temperaturas máximas alcançadas na soldagem de aços por fricção (tipicamente 1300°C) são muito inferiores às obtidas nos processos de soldagem a arco convencional (entre 1700 e 2000°C na poça de fusão), fazendo com que o ciclo térmico apresente gradientes menos severos.

Conseqüentemente, o processo fica isento de produzir estruturas muito duras e frágeis, sensíveis à fissuração por hidrogênio, descartando então a possibilidade deste defeito. Para este experimento, foi adotada a configuração de manter o corpo de prova de Cr-Ni fixo e o de aço carbono móvel durante o processo.



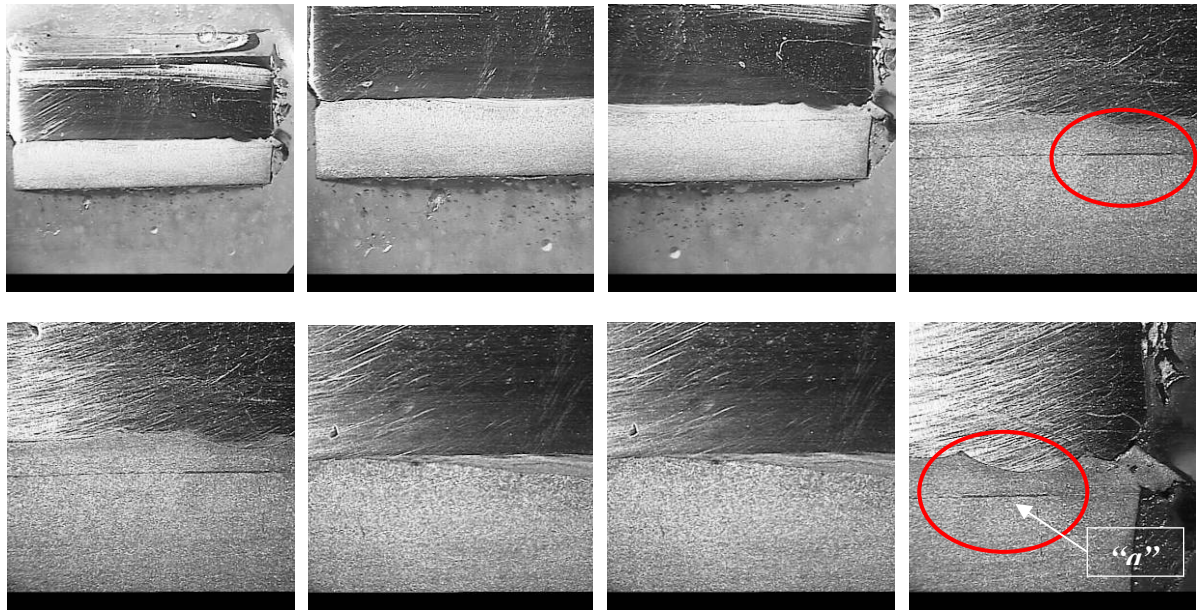
**Figura 6. Análise metalográfica do experimento 2 (Inox fixo; tempo 70s)**

Em seguida, no experimento 2, o parâmetro de tempo de soldagem foi alterado para 70s. A figura 6 demonstra o resultado obtido. Neste resultado, percebe-se que a união entre as peças ocorreu e apresentou uma redução no número de trincas, vazios (poros) e segregações, quando comparado com o experimento 1, porém sugere que a pressão e ou o tempo de soldagem devem ser aumentados. É sabido, que a presença dessas porosidades e/ou segregações, não está associada à solidificação, já que o processo ocorre no estado sólido. Já a abertura de trincas, pode ocorrer, durante o resfriamento da junta. Configuração: Corpo de prova Cr-Ni fixo e aço Carbono móvel.



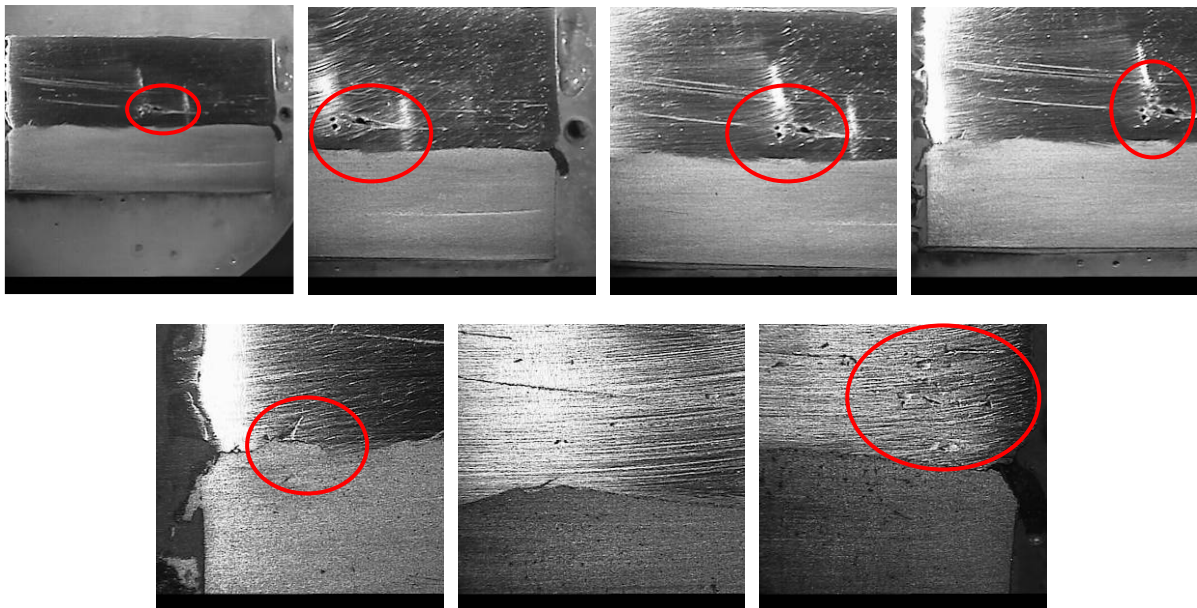
**Figura 7. Análise metalográfica do experimento 3 (Inox fixo; tempo 80s)**

Na análise da metalografia do experimento 3, percebe-se a ocorrência de trincas, vazios e inclusões de filmes estranhos ao processo, sendo estas, características de um processo onde há baixa pressão exercida sobre o corpo de prova durante o mesmo. No caso deste experimento, não foi possível imprimir uma pressão maior sobre os corpos de prova devido ao baixo torque final da máquina ferramenta, o que provocava a parada do eixo da mesma sempre que era exercido um esforço de compressão maior sobre os corpos de prova.



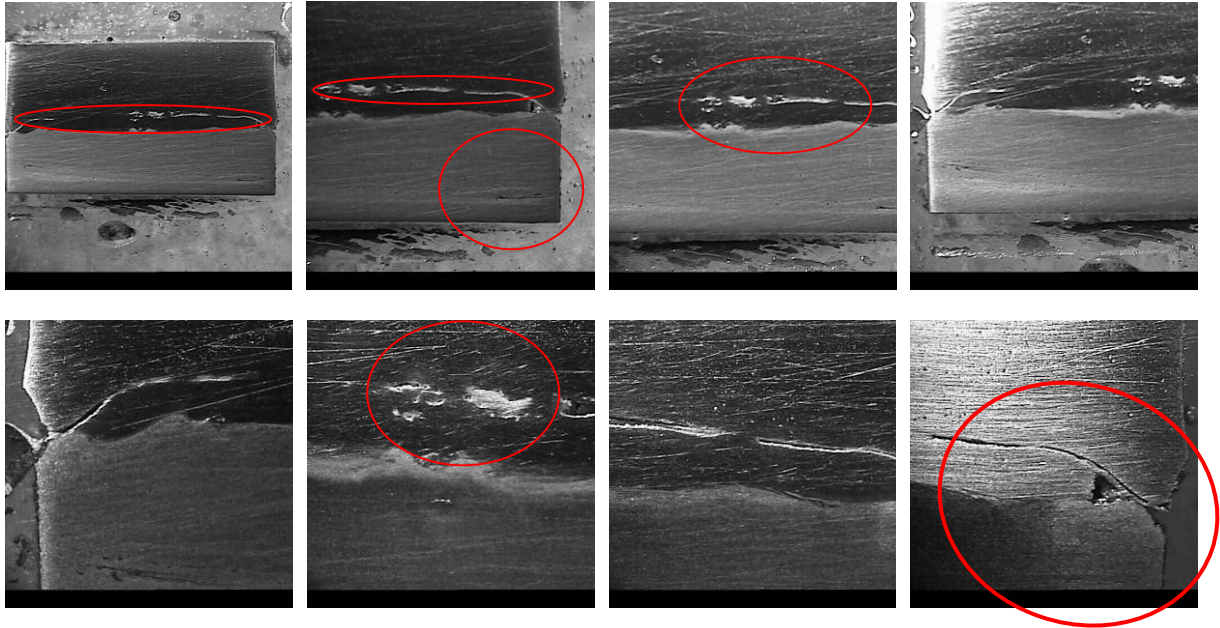
**Figura 8. Análise metalográfica do experimento 4 (Aço carbono fixo; tempo 50s)**

Para o experimento 4, foi alterada a configuração dos corpos de prova de maneira que o de Cr-Ni agora assume a posição móvel e o aço carbono a posição fixa. Durante a análise metalográfica, observa-se que houve uma boa aderência entre as duas superfícies, contudo, verificou-se um destacamento linear da superfície na **área "a"**.



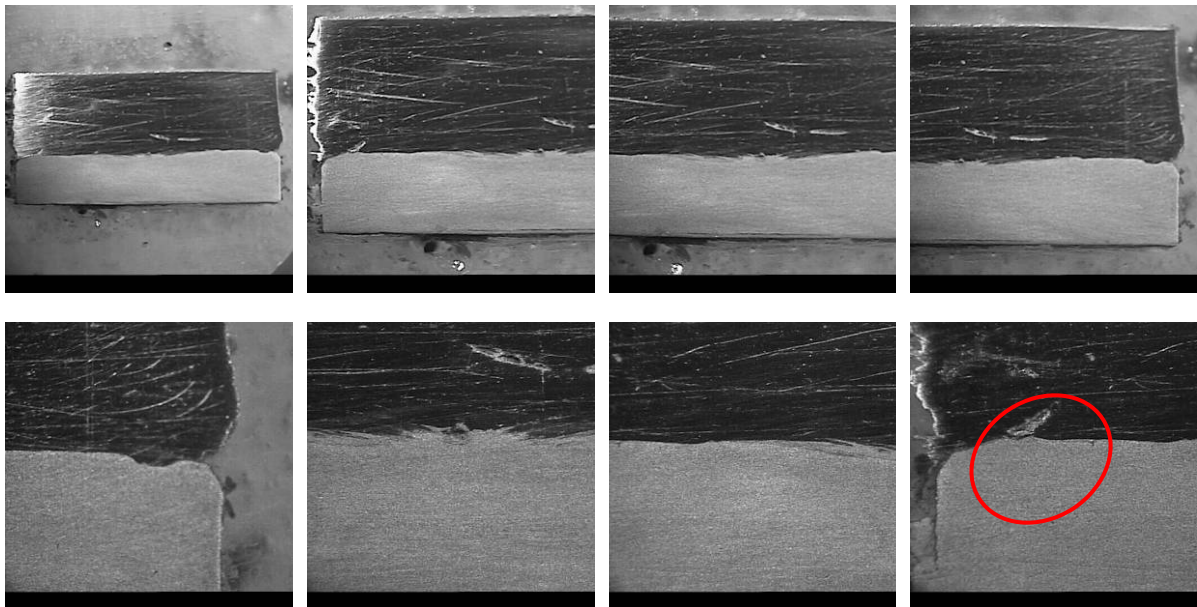
**Figura 9. Análise metalográfica do experimento 5 (Aço carbono fixo; tempo 60s)**

O experimento 5 manteve a configuração dos corpos de prova na máquina ferramenta. Na análise metalográfica foi evidenciada a ocorrência de inclusões e vazios. As inclusões, em princípio, podem, ter advindo do Cr-Ni, uma vez que este material possui elementos de liga em maior quantidade que o ABNT 1020, portanto há uma maior probabilidade de estes, por dissociação, durante o processo terem migrado até algum ponto da junta ou na periferia da mesma. Esta teoria, contudo, demanda análises mais aprofundadas e fundamentação por estudos do processo e caracterização dos materiais presentes na inclusão.



**Figura 10. Análise metalográfica do experimento 6 (Aço carbono fixo ; tempo 70s)**

O experimento 6, conforme a metalografia evidencia, houve a ocorrência de inclusões e vazios, ambas as discontinuidades na área do corpo de prova de Cr-Ni o que pode, por análise, ser justificado pela natureza da liga, tanto pela composição química rica em elementos, como pelo comportamento físico caracterizado pela maior condutividade térmica do material o que interfere no tempo de solidificação diferenciado do aço carbono (menor).



**Figura 11. Análise metalográfica do experimento 7 (Aço carbono fixo; tempo 80s)**

No experimento 7, o tempo total de 80s promoveu uma união bastante razoável entre as peças. Vale salientar que, conforme imagens da metalografia, foram observados vazios e inclusões na área do Cr-Ni e no limiar da junta soldada.

#### 4. ANALISE E DISCUSSÕES

Foi observado com os experimentos que o tempo de soldagem e a posição dos corpos de prova, não tiveram grande influência na presença ou ausência de microrugosidades presentes nas superfícies de fricção. Como resultado, para alcançar as condições de plastificação nas superfícies de atrito, longos tempos de aquecimento, serão exigidos para os futuros experimentos. Longos tempos de aquecimento permitem a propagação de energia térmica ao longo da direção axial das peças e como consequência um volume maior de material é aquecido, podendo resultar, por fim, em uma união mais efetiva da junta soldada.

Foi identificado também que a alta velocidade rotacional (3000 rpm) usada nos experimentos, levavam a uma baixa taxa de resfriamento nos corpos de prova, com isso, geravam largas ZTAs no contorno das superfícies soldadas. Por outro lado, sabe-se que reduzindo a velocidades de rotação para valores mais baixos, podem-se produzir uma fina zona termicamente afetada (ZTA) com um perfil notoriamente mais severo em comparação com uma solda produzida a altas velocidades de rotação.

Como mencionado acima, longos tempos de aquecimento pré-aquecem o metal para controlar a taxa de resfriamento evitando posteriores trincas. Para certas combinações de metais dissimilares, baixas velocidades (e seus curtos tempos de aquecimento) podem minimizar a formação de compostos intermetálicos frágeis. Na prática, o tempo de aquecimento (para uma dada deslocamento) é usualmente controlado pela variação da pressão de soldagem.

As macrografias das juntas soldadas mostraram que, para uma dada posição (fixo ou móvel) dos aços em estudo, houve em ambas as situações, a presença de filmes de segregação, vazios e trincas.

O tempo de aquecimento é especialmente importante para uma baixa taxa de deslocamento porque ele não só define a microestrutura da interface, mas controla também, a profundidade de aquecimento (ZTA).

No fim da fase de aquecimento, dependendo da taxa de resfriamento a austenita se transforma em produtos diferentes: ferrita, perlita, bainita ou martensita. É de conhecimento literário que, o tipo e a fração de volume final da microestrutura serão uma função do pico de temperatura alcançado durante o ciclo de soldagem e da taxa de resfriamento subsequente. Com isso, a microestrutura determinará a força e a suscetibilidade final da solda à fratura frágil, bem como as outras propriedades da junta. O pico de temperatura e a taxa de resfriamento não foram medidos experimentalmente.

O procedimento de ensaio adotado consistiu-se de um critério seguro para a avaliação da qualidade da peça (união soldada), contribuindo assim para uma posterior correção dos defeitos e para uma melhoria da qualidade do processo de soldagem por fricção. Ambos os controles, na oficina e no laboratório, se completam perfeitamente para garantir a confiabilidade do produto final (junta dissimilar de aço-carbono ABNT 1020 com aço inoxidável AISI 304).

#### 5. CONCLUSÃO

Mostrou-se que a soldagem por fricção é um processo relativamente simples e pode auxiliar na solução de muitos dos problemas atuais de engenharia de soldagem. O desenvolvimento de um sistema confiável de soldagem por fricção se faz necessário para que essa vantajosa técnica possa ser devidamente aproveitada na união de juntas complexas “dissimilares”, as quais são feitas hoje por métodos de soldagem a arco.

Foi observado com os experimentos que, a qualidade da solda depende essencialmente da escolha correta do tempo de soldagem e não da posição dos materiais (fixo ou móvel). Os defeitos mais comuns e que foram encontrados no presente trabalho foram: (a) cisalhamento na zona afetada pelo calor, onde se notou a presença de trincas e vazios, que provavelmente foram resultantes de um diferencial térmico, de expansão e contração, resultante da grande diferença de temperatura entre a região de solda e a área adjacente do material, relativamente fria. Essa diferença térmica é responsável pelo alto grau de tensão residual interna da ZTA; (b) falta de união, ou seja, não coalescimento entre as partes metálicas.

Os resultados obtidos demonstram a viabilidade de uso da fresadora ferramenta para este processo, contudo deixa evidente sua limitação, e sugere um maior aprofundamento sobre as influências e otimização dos parâmetros de soldagem, tais como pressão e temperatura.

Verifica-se também a necessidade de que a máquina ferramenta possua torque final compatível com os níveis de atrito entre as peças no processo, pois, com o aumento do esforço de compressão sobre as peças com a intenção de atingir os níveis de pressão necessários ao sucesso do processo (valores na ordem de 50 a 105 MPa) percebeu-se uma tendência a interrupção do movimento do eixo “árvore da máquina” devido ao reduzido torque disponível para superar a resistência imposta pelo atrito das peças ao movimento de rotação.

Foi percebido ainda que durante o processo substituiu-se a pressão necessária pelo tempo, evidenciada pelo resultado obtido com tempos totais maiores.



Por fim, vale ressaltar que a precisão no posicionamento dos corpos de prova a serem soldados na máquina é um elemento de extrema importância, devendo este, na prática, ser posicionado coaxialmente e centrado em ambas as faces do cp's, para com isto obter-se uma solda de boa qualidade. Alguns testes anteriores a execução dos experimentos foram executados para se obter um alinhamento adequado, e conseqüentemente empregá-lo a todos os experimentos planejados.

## **6. REFERÊNCIAS**

Marques, P. V., Modenesi, P. J, e Bracarense A. Q., 2009, "Soldagem Fundamentos e Tecnologia", 3ª edição atualizada – Belo Horizonte, Editora UFMG, 2009.

Wainer, E., Brandi, S. D., Mello, F. D. H., 1995, "Soldagem – Processos e Metalurgia", Editora Edgard Blücher, 1995.

Machado, I. G., 1996, "Soldagem e Técnicas Conexas: Processos", Porto Alegre, 1996.

ASM International Handbook Committee. Welding Handbook, Welding, Brazing, and Soldering. 8º Ed. American Society for Metals, 1991, vol 6., p. 879-884.