



Estudo dos Parâmetros de Soldagem por Atrito de Latão 65/35

Furlanetto T*, Sabor WC*, Hernandes MAP*, Nakamoto FY*, Santos GA*

**Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia De São Paulo, São Paulo, BR*

Resumo. Considerando os processos alternativos utilizados para união de materiais similares, destaca-se o processo de soldagem por atrito rotativo (Rotary Friction Welding - RFW) muito empregado nas indústrias automotivas. Este processo de soldagem ocorre em estado sólido, abaixo da temperatura de fusão entre as partes, apresentando como principais mecanismos a difusão e mistura mecânica. O presente trabalho realizou um estudo que correlaciona as variáveis de controle do processo RFW com a efetiva soldagem do latão binário fio máquina 65/35, empregado na produção de conexões de equipamentos como ar condicionado, evaporadores e/ou condensadores, atualmente soldados pelo processo de brasagem. A verificação da qualidade da solda realizada pelo processo RFW no latão binário fio máquina 65/35 foi analisada por meio de ensaios de varredura e metalográficos, utilizando microscopia ótica e eletrônica, além dos ensaios mecânicos de tração. A união na fase sólida apresentou-se satisfatória, ocorrendo abaixo do ponto de fusão do material, e apresentou um refinamento de grão na região de união do material e um aumento da resistência na região soldada.

Palavras-chave. *Soldagem por atrito rotativo, soldagem de latão por atrito*

Introdução. Peças de metal em contato por atrito as terão para separar somente os contornos dos grãos e a ação dependerá ainda da pressão aplicada sobre a peça, a rugosidade superficial que se deformará plasticamente, até que exista união formando uma solda.

Como consequência, todo o processo deve fornecer energia para realizar a união por pressão e difusão; ter mecanismos de remoção de contaminação de superfícies unidas; prevenir a contaminação atmosférica, ou seus efeitos; permitir que os mecanismos e fenômenos envolvidos sejam controlados. A soldagem por atrito rotativo nestas condições ocorre na fase sólida e é obtida então, por pressão e escoamento plástico dos materiais envolvidos.

Nessa operação e por atrito, as impurezas são expelidas das superfícies juntamente com o metal que flui, formando uma rebarba entorno da peça.



Figura 1. Rebarbas da soldagem.

Nas etapas características da soldagem por atrito pelo menos uma peça sofre rotação; as superfícies são aproximadas e se friccionam por atrito rotativo, a energia assim gerada leva as mesmas ao estado plástico e as peças entram em compressão ocorrendo a soldagem (1).

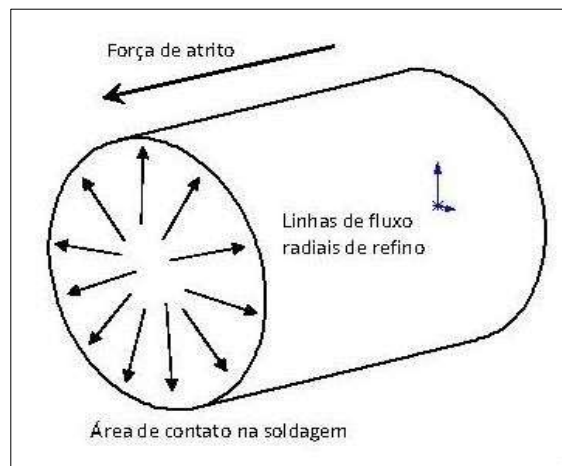


Figura 2. Sentido das linhas de fluxo.

Na soldagem por atrito não é utilizado metal de adição ou consumível; não é necessária atmosfera protetora; a junção apresenta excelentes resistência e propriedades mecânicas e ZTA zona termicamente afetada de pequenas dimensões.

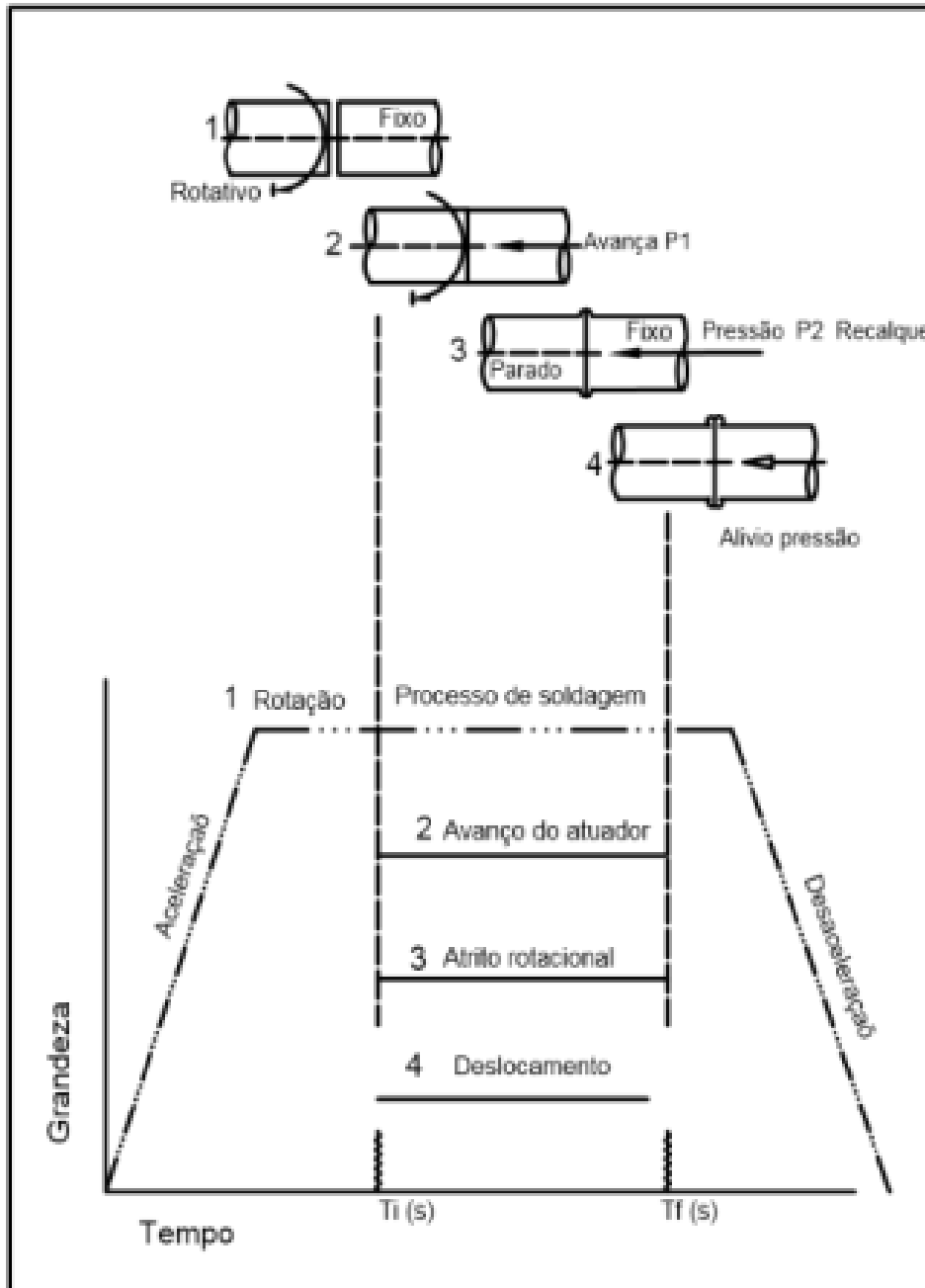


Figura 3. Etapas do processo de soldagem por atrito.

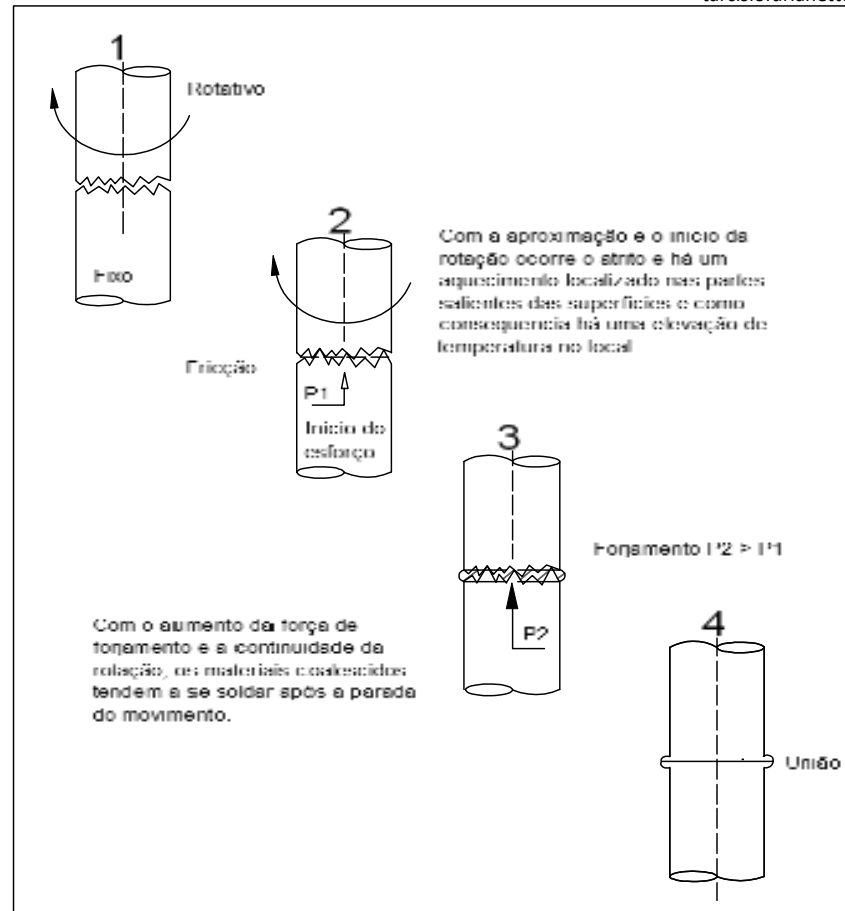


Figura 5. Mecanismos do processo de soldagem por atrito.

Objetivo Geral. Obter juntas soldadas no estado sólido por atrito rotativo, de pinos cilíndricos compostos de latão binário fio-máquina 65/35 que possam ser utilizados na fabricação de terminais e derivações de tubos de condensadores. As junções foram obtidas pelo processo de soldagem por atrito rotativo coaxial de dois cilindros, com uma parte girando e a outra estacionária, que combina o calor gerado entre o atrito de duas superfícies e deformação mecânica por forçamento a quente.

Objetivos Específicos. Apresentar dados e conclusões por meio de ensaios de tração e imagens óticas por M.E.V para ajudar a enriquecer a literatura sobre o assunto ao apresentar dados e realizações reais para a soldagem. Informações adicionais foram coletadas para análise, tais como: tempo total de processo, pressão necessária para forçamento sobre o material e estabilidade do processo.

Considerações para Soldagem no Estado Sólido. O calor gerado é confinado à interface, o trabalho a quente aplicado à área de solda resulta em um refinamento de grão (4). A soldagem

ocorre pela aproximação das superfícies de peças a uma distância suficientemente curta para a criação de ligações químicas entre os seus átomos, conforme apresentado na Figura 8. Porém, estas ligações não ocorrem tão facilmente, pois a aproximação das superfícies a distâncias suficientes para a criação de ligações químicas entre os seus átomos pode ser dificultada pela rugosidade microscópica, camadas de óxido, umidade, gordura, poeira e outros contaminantes existentes em toda superfície metálica (5).

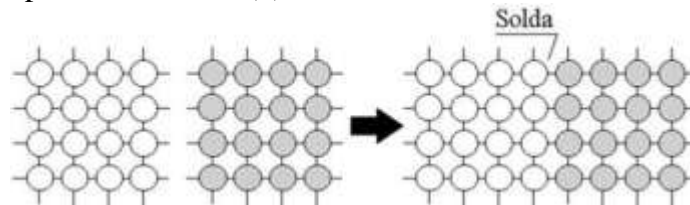


Figura 8. Teoria da ligação (MODENESI, 2006).

O processo é eficiente do ponto de vista da energia e ambientalmente amigável, onde os metais e as ligas são soldados por fusão dos metais. Juntas soldadas de materiais com baixa soldabilidade podem ser encontradas com defeitos de soldagem. Algumas séries de liga de Al, Cu e Mg não são de todo soldáveis por fusão e, por conseguinte, a soldagem por FSW Friction Stir Welding (soldagem por fricção) é útil para unir tais materiais metálicos (6).

Uma solução sólida binária de dois metais será formada em todas as proporções: se os átomos de um deles puderem substituir os átomos na estrutura cristalina do outro, teremos uma solução sólida substitucional em proporções e temperaturas adequadas (7).

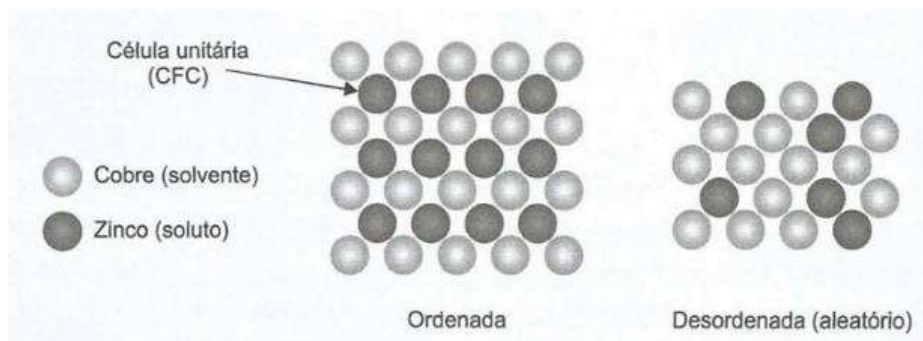


Figura 9. Solução sólida substitucional com grade ordenada e desordenada de uma liga de latão (SANTOS, 2015).

A soldagem por fricção produz baixa distorção, alta qualidade, baixo custo, para soldas de alumínio e outras ligas, mesmo para aquelas que são difíceis de soldar convencionalmente.

Poucas tentativas foram feitas para soldagem por fricção para ligas de cobre, apenas algumas tentativas foram feitas até agora sobre a aplicação do processo FSW para ligas de Cu-Zn e observação em detalhes das propriedades metalúrgicas e mecânicas das soldas (8). Essa nova composição química após à solidificação normalmente leva a formação de fases intermetálicas frágeis e à formação de uma ampla ZTA zona termicamente afetada (2).

O processo exemplificado na Figura 10 envolve a aplicação de pressão inicial P_1 em um intervalo de tempo inicial t_1 , seguido de frenagem da velocidade de rotação, e aplicação de pressão de forjamento P_2 no intervalo de tempo t_2 (2).

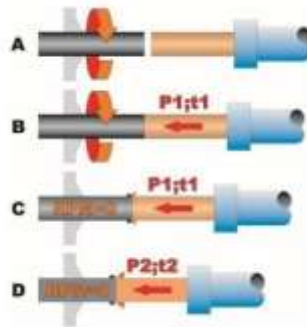


Figura 10. Etapas do processo de soldagem por atrito (ALVES, 2016).

Outra forma de representar o processo de solda por atrito contínuo é através do gráfico Figura 11 (9)), onde estão indicados todos os processos envolvidos com seus respectivos tempos de aplicação.

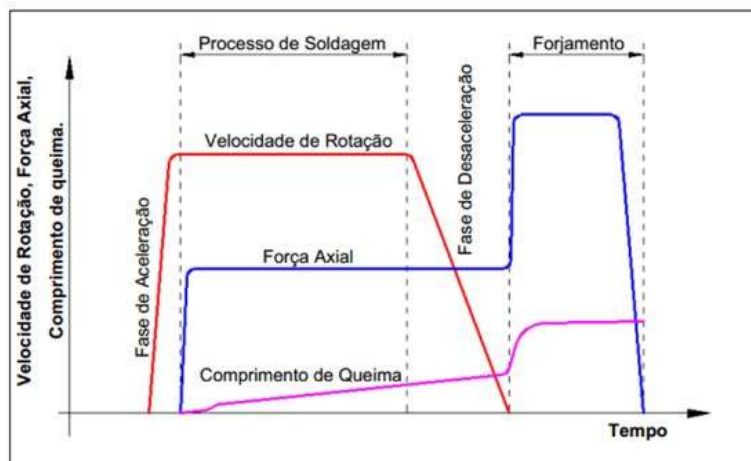


Figura 11. Variação dos principais parâmetros de solda por atrito contínuo (SOUZA, 2006)

Escolha do Tipo da Liga de Latão. Como pode-se notar no diagrama de fases da Figura 12 do sistema binário cobre-zinco, considerando as condições de equilíbrio (resfriamento de 1 °C / minuto) a fase β não aparece em percentuais de 35 %. (10).

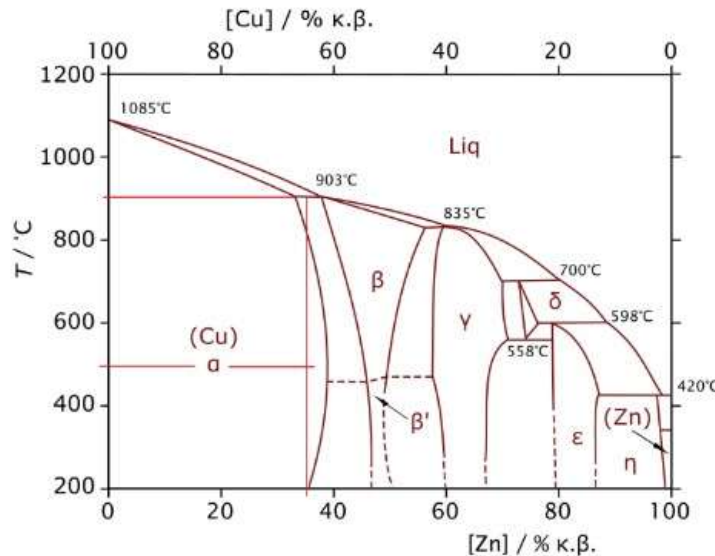


Figura 12 . Diagrama de fases para liga 65/35 (CALLISTER, 2016)

Com o latão 65/35, fazem-se fios para rebites, parafusos, bijuterias, molas, adornos e materiais para eletro erosão. A característica das ligas de cobre-zinco é a facilidade relativa que o zinco se introduz na mistura. O zinco é também um elemento residual em bronze de alumínio e ligas cobre- níquel, podendo causar porosidades ou trincas (11).

Parâmetros Utilizados na Soldagem

Velocidade de Rotação. É a variável (1) de menor influência na qualidade da solda, podendo variar bastante, como é o caso da liga de alumínio comercialmente puro (1800 rpm) e da liga de cobre comercialmente puro (8000 rpm). (11).

Pressão para Aquecimento das Faces Soldadas. Caso a pressão seja muito elevada, o aquecimento poderá ser excessivo o que poderá causar fragilização da ZTA, e



consequentemente, produzir juntas soldadas incompletas ou com falhas. Durante a realização da soldagem a pressão P1 é mantida constante pelo tempo ajustado (1 2).

Tempo de Aquecimento Inicial. O tempo de aquecimento T_i é de fundamental importância na primeira fase de soldagem, que se inicia com o contato entre os materiais e termina com a frenagem da máquina, momento em que o movimento de rotação e aplicação da pressão P1 são interrompidos bruscamente iniciando a aplicação da pressão de recalque P2 e do tempo de forjamento T_f (13).

Pressão de Forjamento. O início da segunda fase de soldagem, também conhecida como fase de forjamento, começa logo após a aplicação da pressão P1 no tempo T_i . A aplicação da pressão P2 no tempo t_2 caracteriza essa etapa do processo e é responsável pelo término da soldagem (14).

Da mesma forma que acontece na fase de aquecimento, os valores dos parâmetros na fase de recalque devem ser definidos considerando a combinação dos parâmetros de pressão P2, do tempo T_i e a velocidade de soldagem.

Tempo de Forjamento. O tempo T_f juntamente com a velocidade de soldagem, é responsável pela aplicação efetiva da pressão de recalque P2. Quando se encerra o período de tempo T_f é completado o ciclo de soldagem.

Se o tempo de forjamento T_f for excessivo, combinado com o valor da pressão de forjamento P2 e com a velocidade de soldagem, são obtidas junções com baixas propriedades mecânicas (12).

Materiais e Métodos. Velocidade de rotação - As recomendações para soldagem por atrito variam de 1800 (1) a 3800 rpm (12) e a recomendada pela (15) é de 2200 rpm. Pressão P1 sobre o material para início do processo e para início de aquecimento varia de 27,5 bar (12) até 400 bares (1).

Tempo de atrito T_i para aquecimento e acionando P1 são variáveis de 7 s a 42 s, segundo (12) e (1). Pressão de recalque P2 após a parada da rotação, foi estabelecido e experimentado valores acima de P1 a título de recalque e segundo a (15), é de 63 Mpa.

Equipamento de Soldagem

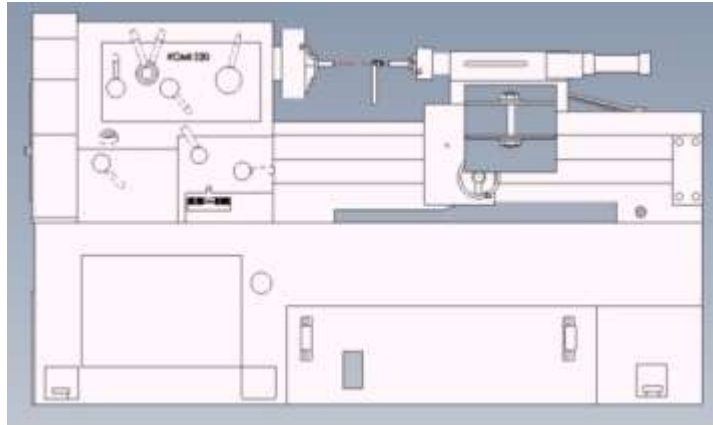


Figura 13. Torno com o sistema de obtenção das soldagens

Foram necessárias várias alterações no torno mecânico original para adequação aos esforços exigidos pelo processo:

- Reforços e apoios mecânicos no torno Romi S20 para garantir rigidez
- Produção e adaptação das peças do reforço mecânico e controle de rotação;
- Instalação do atuador hidráulico para garantir força coaxial de forjamento e alinhamento dos eixos coaxiais;
- Instalação e testes da unidade hidráulica para ação do atuador linear;
- Instalação do PC e programa de controle do processo;
- Instalação dos alinhadores para início e garantia da soldagem.

Controle da Temperatura durante o Processo de Soldagem.



Figura 14. Termômetro LUTRON e termopar para captar temperatura.

Variações de temperatura ambiente podem alterar os resultados obtidos e utilizou-se um termômetro digital Lutron TM-947SD, que forneceu a variação durante o processo, captada por um termopar do tipo K cromel-alumel posicionado no lado do pino fixo de latão a uma distância aproximada de 10 mm da interface de soldagem. Para obter as temperaturas, após o termopar ser inserido na parte interna do corpo fixo em um furo de 5 mm, foi feita a limpeza das faces de contato e adição de pasta térmica para melhorar a transmissão de calor entre a superfície interna da ponta do termopar e o corpo fixo, sendo que as maiores temperaturas registradas no processo foram de 500 °C.

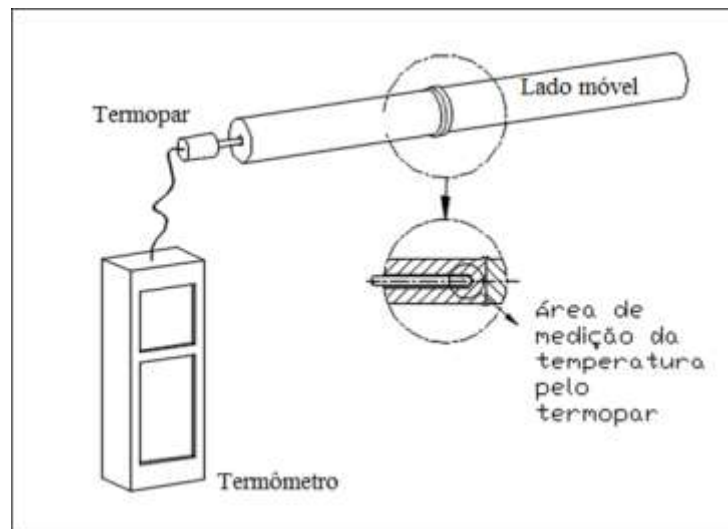


Figura 15. Sistema de captação interna da temperatura.

Após o termopar ser fixado na parte externa do corpo fixo foi feita a limpeza das faces e adição de pasta térmica para melhorar a transmissão de calor no corpo fixo. As maiores temperaturas registradas no processo foram 500 °C com o termopar na região externa.



Figura 16. Adaptador de fixação externa do termopar lado fixo.

Matéria-prima Utilizada para os Ensaio. O material utilizado foi a liga latão fio-máquina 65/35, em forma de barras cilíndricas trefiladas com diâmetro 15,87 mm, tamanho de grão variável de 0,025 a 0,060 mm, cortadas e usinadas com pontas retas em 70 mm, fornecido pela Termomecanica São Paulo S.A. de São Bernardo do Campo.

Na condição de fornecimento, essas barras foram submetidas ao processo de recristalização (tratamento térmico) para promover o crescimento do grão e a retirada da fase β da microestrutura, portanto, na condição de fornecimento essas barras estavam isentas de fase secundária (β). Para este material a (15) especifica limites máximos e mínimos para escoamento e resistência a tração assim como alongamento mínimo de 45 % e nos testes se identificou estiramentos acima de 60%.

Corpo de Prova Comprovação do L.R.T.

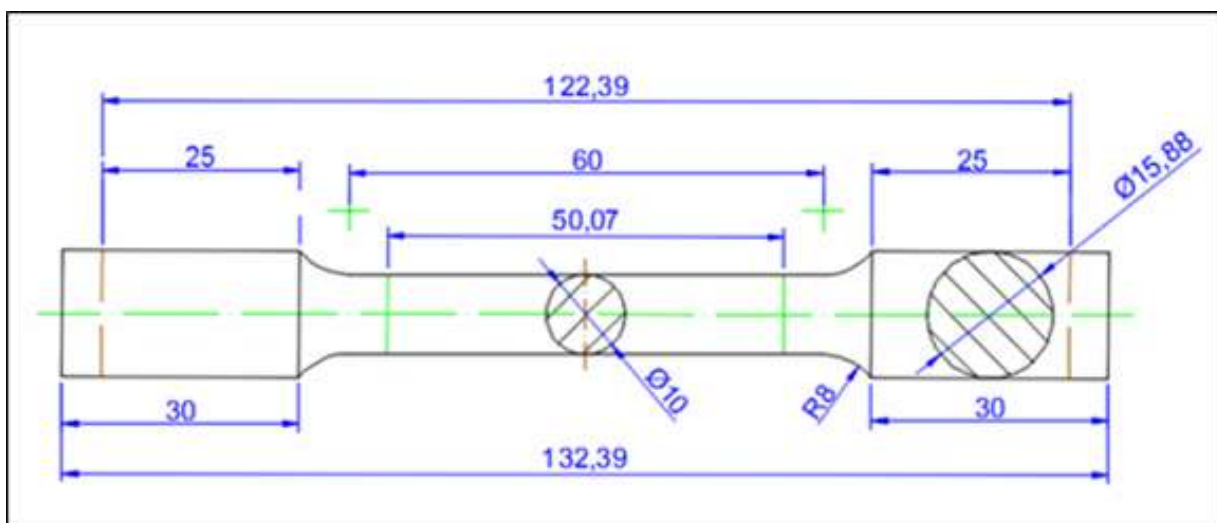


Figura 17. Corpo de prova para ensaios de tração conforme A.B.N.T. 6892-1

Os corpos de prova originais de fornecimento antes e depois de soldados foram usinados conforme ABNT NBR ISO 6892-1 (16) de 27/03/2015, e submetidos a ensaios de tração em uma máquina da marca KRATOS v2.6 com uma célula de carga de 100 kN (10.000 kgf), a temperatura ambiente de 25°C, e com uma velocidade de ensaio de 10 mm/min.

Medições

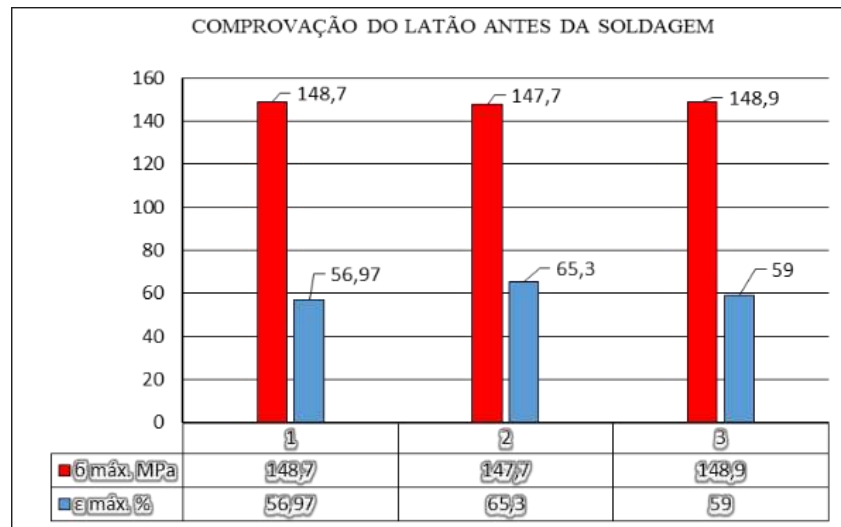


Figura 18. Valores dos testes do latão original

Em três ensaios de comprovação, o material original latão 65/35, que segundo (10), mostraram uma média de resistência L.R.T. de 148,43 MPa e apresentaram fratura dúctil com média de 60,42 %.

Realização dos Experimentos. Abreviaturas utilizadas para os parâmetros de soldagem.

- T_i Tempo de atrito (s)
- T_f Tempo de forjamento (s)
- T_t Tempo total do ciclo (s)
- P_1 Pressão de atrito (MPa)
- P_2 Pressão de forjamento (MPa)
- t_i Temperatura inicial ($^{\circ}\text{C}$)
- t_2 Temperatura de forjamento ($^{\circ}\text{C}$)
- PSM Pressão de forjamento (MPa)

Obtenção do L.R.T. após a Soldagem. Foram feitos 4 ensaios de tração – Figura 19 - nos corpos após a soldagem em máquina de tração EMIC com velocidade de deslocamento 10 mm/min. e pré-carga de 600 N.

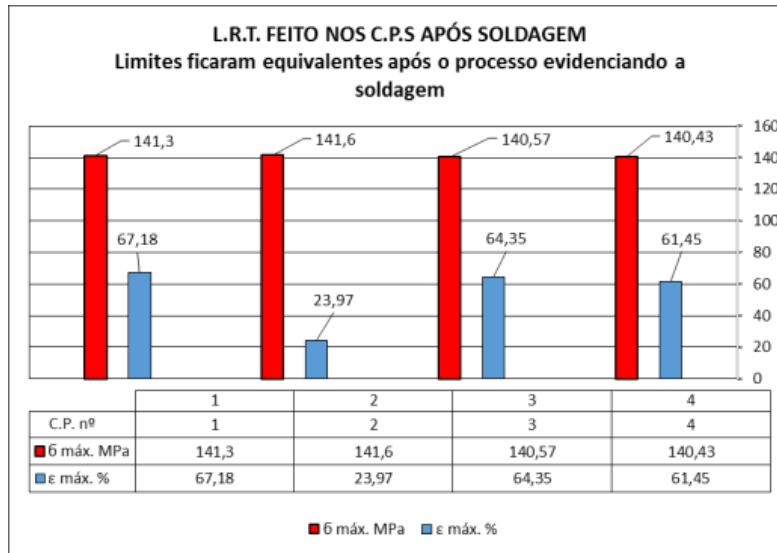


Figura 19. Valores após soldagem

Foram realizados 10 testes de nº 7 ao 17 com total sucesso, onde iniciou-se com Tt de 95 s e progrediu-se com a melhoria visual da rebarba para Tt de 35 s conseguindo assim a estabilidade dos ensaios, com os dados apresentados na tabela 7, onde o processo se mostrou estável e com rebarba aceitável para efeitos práticos.

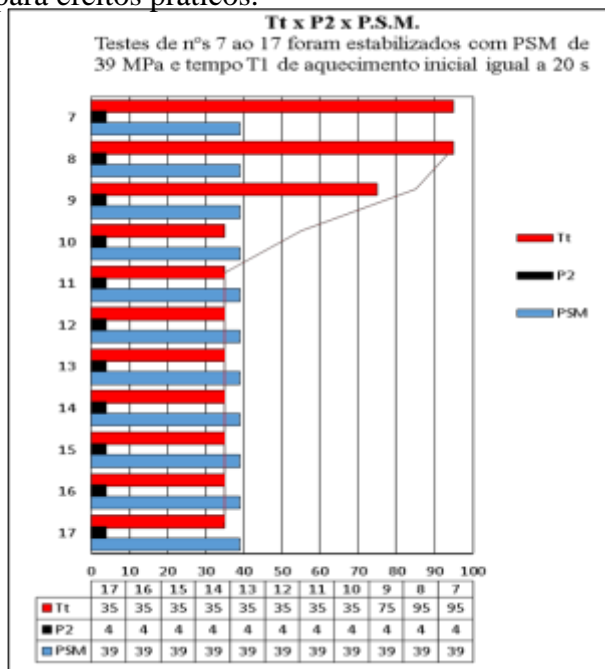


Figura 20 – Comparativo entre Tt - P2 – PSM dos 10 últimos ensaios soldados

Estes 10 últimos ensaios ficaram estáveis com o mesmo comportamento de processo e tempo total T_t de 35 s, e foram ensaiados 4 para comprovação do L.R.T. e 2 cortados, lixados e polidos para ensaios da micrografia e execução de imagens.

Nos 4 ensaios de tração realizados após a soldagem, os corpos de prova foram usinados conforme a norma ABNT considerando a rebarba como centro da peça, e sendo submetidos a deformação plástica a frio, os testes mostraram uma média de resistência L.R.T. de 140,97 MPa após a soldagem contra 148,43 MPa antes da soldagem. Evidencia-se no teste nº 10 que com o aumento do tempo de aquecimento ocorre uma propagação de calor por condução, havendo um aumento da ZTA e diminuição do alongamento (23,97 %), sem modificar o limite de resistência máximo do material.

Todos os 4 corpos ensaiados tiveram o rompimento fora da área da soldagem e três deles de nº 15,16 e 17, apresentaram fratura dúctil, e o quarto de nº 10 (com maior tempo inicial de atrito de aquecimento) apresentou fratura frágil com alongamento de 23,97 % e neste caso considerou-se o L.R.T. que foi de 141,60 MPa, sendo que os corpos que tiveram fratura dúctil com média de 64,32 %, apresentaram redução de seção reta causada pela deformação e rompimento tipo taça e o corpo que teve fratura frágil com 23,97 % teve rompimento brusco.



Figura 21. Corpos soldados de nº 8 ao nº 13 com a regressão da rebarba.

Resultados e Discussões. A figura 22 mostra a estrutura original submetida ao processo de recristalização (tratamento térmico) para promover o crescimento dos grãos e a retirada da fase β do zinco da microestrutura. Tamanhos entre 0,025 mm a 0,040 mm antes da soldagem

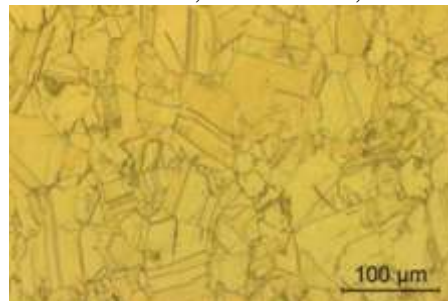


Figura 22. Estrutura original submetida ao processo de recristalização

Foi feito corte axial na região central soldada para evidenciar ZTA e linha de soldagem para análise estrutural com imagens e medição dos grãos onde nota-se na região central ZTA entre os corpos rotativo e fixo (A e B), conforme figura 23.

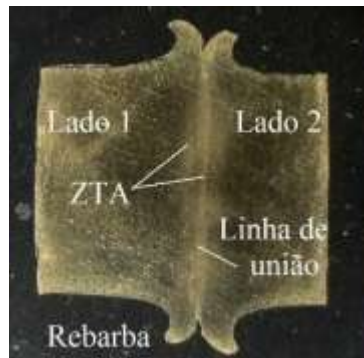


Figura 23. Corte axial na região central soldada.

Para análise de grãos soldados, há evidências do aparecimento da fase beta intergranular do zinco. Na região da solda há a formação de estrutura refinada com grãos entre 0,005 mm a 0,010 mm, conforme figura 24.

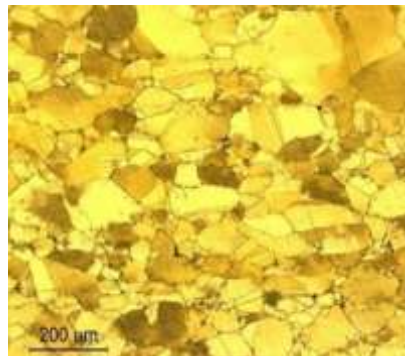


Figura 24. Análise de grãos soldados.

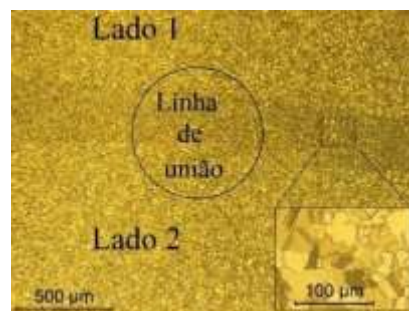


Figura 25. Evidencia na imagem da zona central do ensaio de soldagem do ensaio nº 15 (Tt 35 s) zona central das partes unidas entre lado 1 e 2.

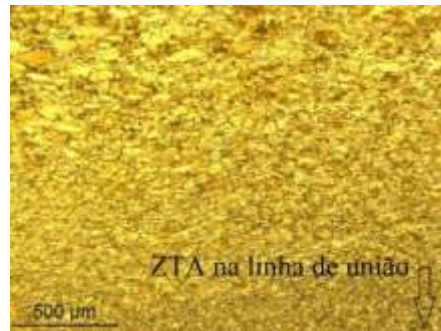


Figura 26. feita em um dos lados da soldagem nº 16 evidencia o aumento progressivo dos tamanhos de grão ao afastar da zona central soldada.

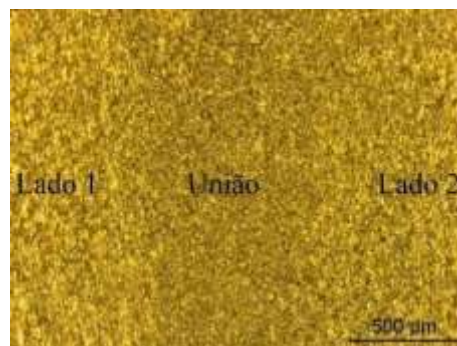


Figura 27. A imagem central do ensaio 16 (com 50 x) e estrutura refinada homogênea com tamanho de grão de 0,010 mm. Percebe-se uma mudança no tamanho dos grãos ao se distanciar a imagem da linha central de junção.

Análise de Microestrutura por M.E.V. Na imagem da figura 28 feitas por M.E.V. antes de soldada, é possível se identificar tamanho de grão entre 45 µm e 50 µm e fase beta do zinco em pequenas porcentagens devido ao resfriamento rápido, evidenciando grãos recozidos com tamanho especificado entre 0,030 e 0,060 mm .

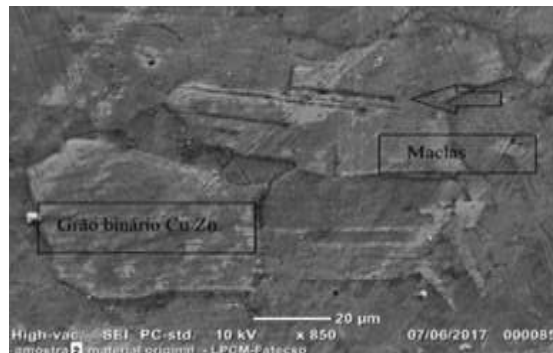


Figura 28. M.E.V. antes de soldada.

Após a soldagem verificou-se um refinamento de grão caracterizando recristalização conforme figuras 29, heterogênea e com tamanho de grão de 0,005 mm.

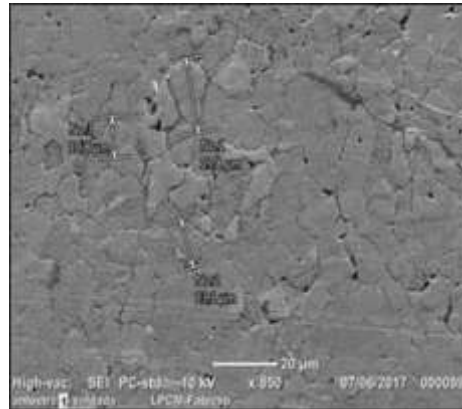


Figura 28. MEV após soldagem.

Resultado Final. O processo mostrou-se possível dentro do esperado nos objetivos, estável nos tempos e com bons resultados comprovados por meio dos testes de resistência e medições pelas imagens óticas e por varredura eletrônica dos grãos, da região central soldada conforme desejado nos objetivos iniciais do trabalho.

Pode-se produzir peças e substituir processos atuais de brasagem por este método e os resultados obtidos encontrados foram uma união na fase sólida abaixo do ponto de fusão dos materiais similares atingindo-se a temperatura de recristalização na fase inicial de atrito para aquecimento do material ocorrendo dessa forma a transformação plástica da estrutura metálica produzindo refinamento do grão.

Pode-se estudar a soldagem de vários outros tipos de terminais ou conexões pela introdução da alteração de dispositivos de fixação no movimento de rotação da placa móvel; e o controle de velocidade de aproximação do lado fixo para início do tempo de aquecimento.

Esses resultados mostram que é possível obter juntas soldadas no estado sólido por atrito rotativo de latão fio-máquina 65/35, que possam ser utilizados na fabricação de terminais de tubos de condensadores e evaporadores entre outros.



Referências.

- (1) MACHADO, I.G. Soldagem & técnicas conexas: processos Porto Alegre – 1996.

- (2) ALVES, E. P. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E ESTUDO DO PERFIL TÉRMICO NA SOLDAGEM POR FRICÇÃO ROTATIVA DE MATERIAIS DISSIMILARES. INPE - SÃO JOSÉ DOS CAMPOS – 2016.

- (3) BATALHA, G.F. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO: JUNÇÃO, SOLDAGEM E BRASAGEM ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO – 2003.

- (4) SINGLA, Y.K., CHHIBBER, R., DUTTA, B.K. Influence of Friction Welding Parameters on the Tensile Strength of Bimetallic Weld Joints – 2016

- (5) MODENESI, P.J.; MARQUES, P.V. Soldagem I - Introdução aos Processos de Soldagem. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

- (6) SHARMA, H.K., BHATT, K., SHAH, K, JOSHI, U. Experimental Analysis of Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys AA6061 and Mg AZ31 Using Circular Butt Joint Geometry – 2016.

- (7) SANTOS, G.A. Tecnologia dos Materiais Metálicos Editora Érica – São Paulo – 2015.

- (8) PARK, H.S., KIMURA, T., MURAKAMI, T., NAGANO, Y., NAKATA K., USHIO, M. Microstructures and mechanical properties of friction stir welds of 60% Cu–40% Zn copper alloy – 2013.

- (9) SOUZA, R.J., 2006 Desenvolvimento, Projeto e Construção de um Equipamento de Reparo de Trincas por Atrito - Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia., MG, 2006.



- (10) CALLISTER JR., W.D. CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS: UMA INTRODUÇÃO. LTC EDITORA – 2016.
- (11) A.W.S. WELDING HANDBOOK V.2, CHAPTER 23, FRICTION WELDING – JULY 1997.
- (12) WAINER, E. et al Soldagem: Processos e Metalurgia - Editora Edgard Blucher – 2011.
- (13) SATHYIA, P.; ARANVINDAN, S.; HAOQ, A. N. Effect of friction welding parameters on mechanical and metallurgical properties of ferritic stainless steel. London: Springer-Verlag, 2006.
- (14) KHAN, N.Z., SIDDIQUEE, A.N., KHAN, Z.A. Friction Stir Welding: Dissimilar Aluminium Alloys – 2017
- (15) A.S.M. METALS HANDBOOK Welding Brasing and Soldering v.6, Metals Park Ohio, USA: Fundamentals of Friction Welding, 1993.
- (16) ABNT NBR ISO 6892-1:2013– Associação Brasileira de Normas Técnicas - Materiais metálicos- Ensaio de Tração, 2015.
- (17) MARQUES, P.V. Tecnologia de Soldagem –1991- 1ª Ed. – B.H. – 2006.