



## Revisão da literatura: Processo de soldagem por fricção e mecanismo de ligação por difusão atômica

Marcelo da Silva Miranda<sup>1</sup>, Rogério de Moraes Oliveira<sup>2</sup>, Eder Paduan Alves<sup>3</sup>, Sergio Luiz Mineiro<sup>4</sup>, Rafael Cardoso Toledo<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Aluno de Mestrado na PG-ETE na área de concentração em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores – CMS, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

<sup>2</sup>COCTE/LABAP - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

<sup>3</sup>Instituto de Aeronáutica e Espaço / Sistemas Espaciais – DCTA, São José dos Campos, SP, Brasil

<sup>4</sup>COCTE/LABAS - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

<sup>5</sup>Instituto Latino-Americano de Ciências da Vida e da Natureza/ILACVN - Universidade Federal da Integração Latino-Americana – UNILA, Foz do Iguaçu, PR, Brasil

marceloo.miranda26@gmail.com

---

**Resumo:** A soldagem por fricção é um processo no estado sólido que tem como base a conversão da energia mecânica em energia térmica através da fricção entre superfícies dos materiais a serem unidos. A temperatura gerada no processo permanece abaixo do ponto de fusão dos materiais envolvidos, porém, sendo suficiente para a ocorrência de difusão atômica, principal mecanismo de ligação na união dos materiais e a consequente formação de compostos intermetálicos. Este tipo de soldagem pode ser utilizada para unir materiais dissimilares. O escopo deste trabalho é apresentar uma revisão da literatura do processo de soldagem por fricção. As características e as variáveis deste processo de junção, bem como a sua influência nos mecanismos de ligação e de difusão atômica nos materiais soldados serão temas a serem abordados.

---

**Palavras-chave:** Soldagem, Fricção, Difusão, Materiais Dissimilares

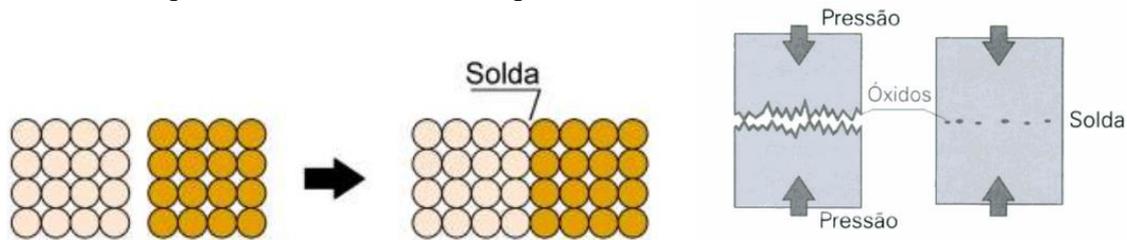
### 1. Introdução

As junções dissimilares resultantes de diferentes combinações de materiais são de grande importância para a engenharia e empregadas em diversas áreas como automobilística, bélica, aeronáutica, nuclear, aeroespacial, etc.

A Associação Americana de Soldagem (American Welding Society – AWS) descreve a soldagem como: “processo de união de materiais utilizado para manter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição (MARQUES. MODENESI e BRACARENSE, 2009).



A Figura 1 demonstra a formação de uma junta soldada por aproximação das superfícies e um modelo de que utiliza de métodos compressivos.



**Figura 1. Esquematisação do conceito de soldagem e modelo de soldagem por métodos compressivos. [Fonte: Adaptado de MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009]**

Os objetivos dos processos de soldagem são de unir materiais similares e dissimilares para aplicações estruturais nas diversas áreas da engenharia. Materiais possuem rugosidades superficiais, camadas de óxidos, impurezas, e diversos defeitos microestrutura que tornam a união de materiais um processo complexo e difícil de ser realizado. No processo de soldagem a adição de calor é feita por vias diretas, ou através de conversão de outros tipos de energia (elétrica, mecânica) em energia térmica, sendo desenvolvidos com a finalidade de facilitar o processo de excitação dos átomos gerando ligações atômicas (AWS, 2001).

Em geral, os processos de soldagem podem ser classificados em duas diferentes categorias:

(1) Processo de soldagem por fusão: a soldagem ocorre por fusão dos materiais envolvidos, metal base ou metal de adição (quando utilizado) através de calor aplicado na região da junta. A solda é formada com a cessão do calor e solidificação do metal na região soldada (MODENESI et al., 2005).

(2) Processos de soldagem no estado sólido: processos de soldagem onde a temperatura é menor que a temperatura de fusão dos materiais envolvidos no processo (AWS, 2001). A energia térmica inserida o sistema é proveniente de transformação de energia mecânica (por pressão e/ou atrito). Em processos como o de fricção, por exemplo, a soldagem ocorre em áreas pequenas que são posteriormente ampliadas devido à deformação plástica, unindo materiais nas áreas de contato (WAINER, BRANDI E MELLO, 1992).

A Zona Termicamente Afetada (ZTA) é definida como a região influenciada pelo calor do processo de soldagem. Esta região, frequentemente sofre uma variação da sua dureza, sendo esta mudança podendo ser observada através de testes com corpos de prova criados a partir das peças previamente soldadas (AWS, 2001). Como os gradientes de temperatura na ZTA são elevados, diferentes tipos de microestruturas podem ser formados em regiões pequenas ao longo da interface de soldada.

Em processo de soldagem por fusão onde a difusão atômica ocorre na fase líquida, os elementos difundidos concentram-se na ZTA, que tende a ser maior do que em processos de soldagem no estado sólido onde os elementos gerados pela interdifusão concentram-se próximos a interface de ligação (ALVES, 2016).



## Soldagem por Fricção (Friction Welding – FRW)

A soldagem por fricção (FRW) tem base na conversão de energia mecânica em energia térmica, através da fricção entre superfícies de duas peças distintas. Neste caso, não ocorre aplicação de calor diretamente e toda energia térmica gerada pelo processo apresenta temperaturas abaixo do ponto de fusão do material das peças soldadas (ASM, 1993). A Figura 2 demonstra esquematicamente o processo de soldagem por fricção.

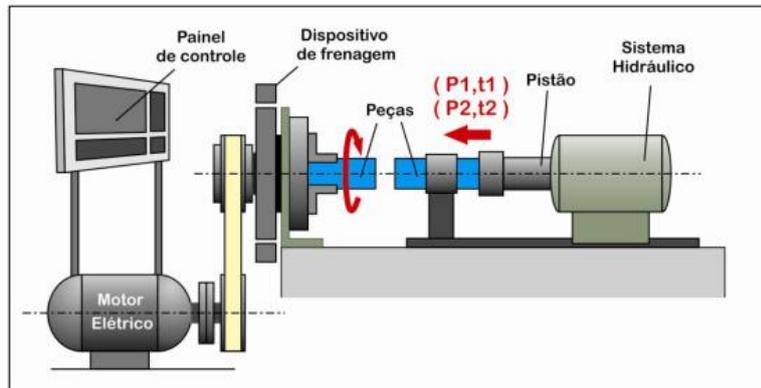
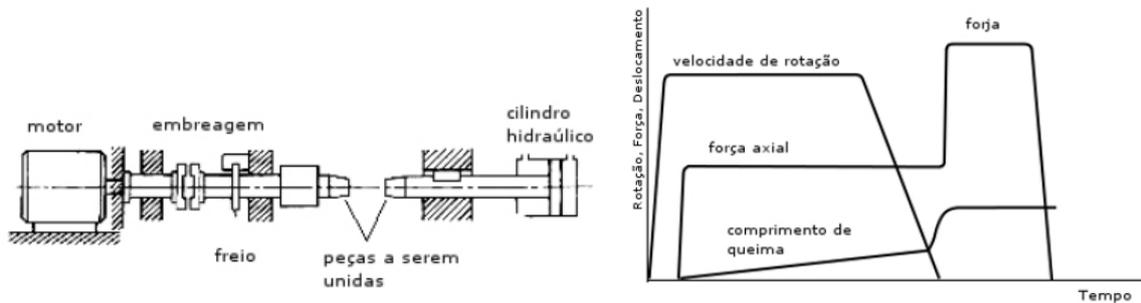


Figura 2. Equipamento de soldagem por fricção [Fonte: ALVES, 2010]

Diferentes variáveis processuais são diretamente influentes no resultado da solda: Velocidade de rotação (RPM), (2) Pressão de Fricção (P1), (3) Tempo de Fricção (t1) (4) Pressão de Forjamento (P2) e (5) Tempo de Forjamento (t2) (KHAN, 2011).

A soldagem por fricção acontece em etapas, sendo que, de acordo com a literatura, existem algumas diferentes denominações para cada um destes processos: a 1ª etapa compreende a fase de aquecimento dos materiais as superfícies em atrito com a influência direta da pressão aplicada e da rotação geram o aumento da temperatura na superfície de atrito. A 2ª etapa a fase de forjamento, a velocidade de rotação é reduzida de forma instantânea (processo convencional) ou de forma gradativa (processo inercial) gerando a rebarba envolvendo a zona soldada (ALVES, 2016). Através da aplicação de uma força de forjamento a união homogênea tende a ser alcançada.

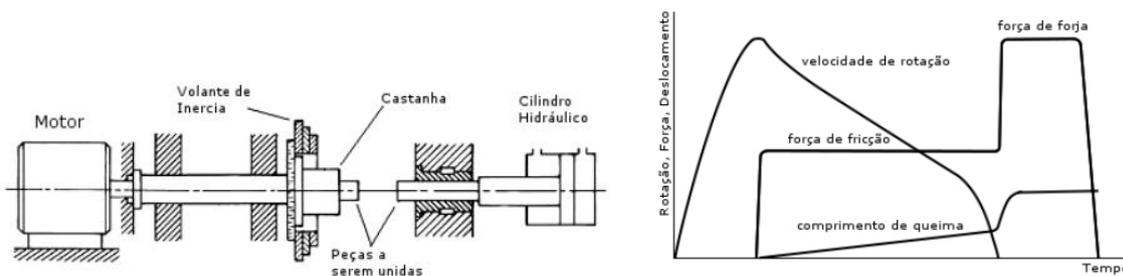
Na soldagem por fricção pelo método convencional, um dos materiais é fixado por meio de pinça na placa submetida a rotação e o outro é posicionado frente a um pistão hidráulico, que se move linearmente ao eixo do equipamento (geralmente acionada por dispositivo hidráulico) (ALVES, 2010). Difere-se do processo inercial pois não existem massas inerciais acopladas no dispositivo rotativo e na etapa de forjamento a parada da rotação ocorre de forma instantânea (LÓPEZ, 2010) (TAVARES, 2017) (ROSADO, 2009). A Figura 3 ilustra esquematicamente a máquina utilizada para este procedimento.



**Figura 3. Equipamento de soldagem por fricção convencional e ciclo de soldagem [Fonte: LÓPEZ, 2010]**

As etapas de soldagem acontecem da seguinte forma (LÓPEZ, 2010) (TAVARES, 2017) (ROSADO, 2009): (1) A peça presa na placa rotativa é acelerada até a velocidade (RPM) pré-definida; (2) A peça no dispositivo fixo move-se de forma que as duas faces das peças entrem em contato; (3) A pressão  $P_1$  é aplicada neste momento respeitando o tempo pré-determinado  $T_1$ ; (4) A máquina é frenada até que a rotação cesse e (5) Uma nova pressão  $P_2$  é aplicada durante o tempo pré-determinado  $T_2$ . Após estes passos, a soldagem é finalizada.

Na soldagem por fricção inercial, o equipamento de soldagem possui massas inerciais acopladas na placa de fixação rotativa que são aceleradas até uma velocidade pré-definida de forma a gerar um momento de inércia desejado para transformação de energia mecânica em energia térmica na interface de solda. A diferenciação do processo ocorre no estágio quatro (4) onde o motor é desligado e a rotação é cessada de forma gradual enquanto ocorre a aplicação da pressão  $P_2$  até que a rotação seja zero (0) (LÓPEZ, 2010) (TAVARES, 2017) (ROSADO, 2009). Após estes passos, a solda está formada. A Figura 4 ilustra esquematicamente a máquina utilizada para este procedimento.



**Figura 4. Equipamento de soldagem por fricção inercial e ciclo de acionamento [Fonte: LÓPEZ, 2010]**

Como todo processo de união, a soldagem por fricção rotativa possui vantagens e desvantagens. Destacam-se como vantagens a não utilização de gases de proteção ou necessidade de materiais de adição para realização da soldagem. Como a temperatura na interface de solda não atinge a fusão dos materiais, todos os defeitos que podem ser causados pela solidificação dos materiais não ocorrem neste tipo de solda, gerando inclusive um ZTA estreita. Por este método, é possível realizar soldagem de materiais similares e dissimilares, não possíveis de serem realizados por processos de fusão. Entretanto, nem todos os tipos de forma geométrica podem ser soldados por este processo. O equipamento utilizado é caro,



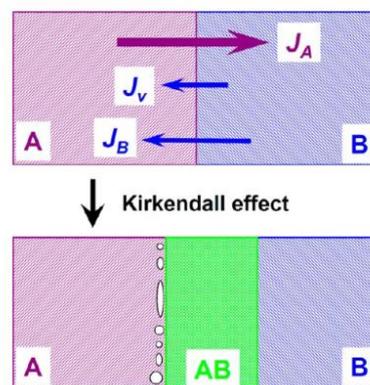
sendo viável apenas para peças como lotes grandes. Em caso de ocorrer vibrações no sistema, as peças podem apresentar defeitos.

A Figura 5 mostra o resultado do processo de soldagem do corpo de prova, pelo método de fricção convencional.



**Figura 5. Pinos soldados por fricção com formação de “flash” [Fonte: ALVES, 2017]**

A soldagem por fricção é um processo no estado sólido e apresenta como principal mecanismo de ligação a difusão atômica, processo no qual átomos de um determinado elemento químico, pertencentes a um determinado material, são transportados em direção de outro material contidos em um sistema sob regime transiente, ocorrendo contato entre ambos, ou por proximidade, em casos específicos, por determinado período de tempo. Na metalurgia, o processo que descreve a difusão atômica simultânea entre dois materiais em contato é chamado de efeito Kirkendall. Em 1942, Kirkendall sugeriu que dois diferentes materiais possuem taxas de difusão diferentes e que o fluxo de matéria é desigual para cada um dos materiais (WANG, 2013). A Figura 6 demonstra dois materiais sob o efeito Kirkendall (materiais dissimilares A e B) com seus fluxos  $J_A$  e  $J_B$ , e o fluxo sobre a região “vazia”  $J_v$ , ou seja, na zona de mistura.



**Figura 6. Difusão e fluxo atômico entre materiais dissimilares [Fonte: WANG, 2013]**

Como demonstrado na Figura 6, o metal A tem um maior fluxo de difusão comparado ao metal B.

A estrutura cristalina dos materiais sólidos restringe a migração dos átomos, o que permite a classificação dos mecanismos de acordo com os deslocamentos atômicos específicos. Os mecanismos de difusão podem ser divididos em dois grupos (REED-HIIL, 1982): (1)



Átomos que se movimentam de forma isolada como nos mecanismos de difusão por vacâncias e a difusão pelos métodos intersticiais e (2) Átomos que se movimentam de forma cooperativa ou coletiva como nos mecanismos de difusão coletivos e por intersticialidade.

No mecanismo intersticial, átomos do soluto são consideravelmente menores que os átomos do solvente, assim ocupando os interstícios da rede hospedeira, resultando em uma solução sólida intersticial. No mecanismo coletivo, os átomos do soluto possuem tamanho similar aos do solvente e formam soluções sólidas de substituição e, nos metais, ocorre uma troca direta dos átomos da vizinhança atômica, com movimentação de ambos simultaneamente. No mecanismo de vacância um átomo difunde-se quando se move para um “espaço” vazio na rede atômica, sendo este o mecanismo dominante nas difusões ocorridas nos metais (MEHRER, 2007). Concentrações significantes de defeitos de vacância são presentes em metais conforme o aumento do gradiente de temperatura (CALLISTER, 2007). O efeito Kirkendall comprova o mecanismo de difusão por lacunas (REED-HILL, 1982).

No mecanismo de divacância, sob a existência de energias de ligação, podem ocorrer o surgimento de aglomerados de vacâncias, sendo mais comuns com o aumento da temperatura no processo, sendo este, o mecanismo dominante em temperaturas ao redor de 2/3 da temperatura de fusão dos materiais envolvidos no processo. No mecanismo da intersticialidade, onde átomos do soluto e do solvente tem tamanhos muito próximos, movem-se simultaneamente, e assim, um átomo do soluto ocupa a localidade de um átomo do solvente, que ocupa o lugar de um átomo vizinho e assim ocorre de forma sequencial (MEHRER, 2007). Este mecanismo é encontrado na interdifusão de impurezas como hidrogênio, carbono, nitrogênio e oxigênio que são átomos pequenos o suficiente para se movimentar nas posições intersticiais. Nos metais, o processo de intersticialidade da movimentação atômica ocorre mais rápido que o da vacância, por exemplo, devido ao tamanho dos átomos (CALLISTER, 2007).

Existe uma classe de materiais formada em processos de ligação de materiais metálicos denominada como compostos intermetálicos, cuja composição de estrutura cristalina difere-se dos seus metais constituintes (BERDOVSKY, 2008). De forma diferente do que ocorre com as ligas de solução sólida, os compostos intermetálicos são estequiométricos, ou seja, ocorre um balanço químico dos materiais envolvidos. As ligações constituintes são provenientes das combinações de ligações metálicas, iônicas e/ou covalente (CANARIM, 2012). A formação destes compostos ocorre em processo de baixo aporte térmico. Este fator é facilmente observado em soldagens onde a temperatura do processo é muito inferior a temperatura de fusão dos materiais envolvidos. Intermetálicos em geral ocupam uma posição entre metais e cerâmicas, quando caracterizados pelas suas propriedades físicas e mecânicas, e possuem fortes ligações atômicas. Entretanto, em juntas soldadas, dependendo da sua espessura, sua presença pode causar fragilização, e conseqüentemente, danos permanentes na peça/item fabricado.

Quando materiais dissimilares são envolvidos em um processo de soldagem, a formação de compostos intermetálicos ocorre em dois diferentes estágios. Primeiramente, devido a migração dos átomos através da interface de soldagem, ocorre a formação de uma solução sólida supersaturada. No segundo estágio, a esta solução sólida supersaturada atinge um determinado nível, no qual ocorre uma transformação em um composto intermetálico. Átomos dissimilares possuem forças de ligação em maiores escalas do que átomos



semelhantes, e com isso, a formação das estruturas cristalinas acontecem em uma distribuição ordenada de átomos onde cada um deles é cercado por outro dessemelhante (SAUTHOFF, 1995). Os aluminetos de ferro são compostos formados devido à difusão de átomos de alumínio reagindo a átomos ferrosos em processos de aquecimento dos materiais. Assim, ocorre um favorecimento da formação de compostos frágeis  $Al_xFe_y$  devido a maior difusão do ferro no alumínio do que de forma contrária (RATHOD, 2004).

## 2. Metodologia

Foram realizadas pesquisas bibliográficas em livros, artigos, dissertações e teses realizadas sobre as áreas de união de materiais através de processos diversos de soldagem, com foco principal nos processos no estado sólido como a soldagem por fricção. Buscou-se principalmente os relatos relacionados ao comportamento da microestrutura das regiões soldadas, os mecanismos de ligação e difusão atômicas ocorridos durante o processo, os efeitos nas interfaces dos materiais, as áreas afetadas pelo calor gerado no procedimento e as consequências da presença e/ou formação de camadas de materiais na interface soldada.

## 3. Resultados

As pesquisas realizadas sobre o tema resultam no levantamento teórico sobre os processos de soldagem, com ênfase nos que ocorrem no estado sólido e com as particularidades ocorridas neste procedimento. Foram coletadas informações pertinentes sobre as características e variáveis processuais e suas influências nos materiais soldados, os mecanismos de ligação e difusão que podem ocorrer durante a soldagem, fatores referentes as causas e consequências causadas pelo baixo aporte térmico gerado no processo e a formação de compostos na região soldada.

## 4. Conclusão

Desta forma, conclui-se que a revisão da literatura gera o entendimento dos diversos fatores que ocorrem durante o processo de soldagem por fricção de materiais dissimilares, desde as vantagens da utilização deste processo ao unir materiais com características diferentes até os problemas que podem ser gerados pelas peculiaridades do processo, como baixo aporte térmico e da difusão atômica ocorrida. Entende-se que é de vital importância conhecer os mecanismos de ligação e difusão em processos do estado sólido para compreender os resultados gerados caracterização microestrutural de materiais ou peças soldadas por este método.

*Agradecimentos: Agradeço de antemão ao Dr. Sérgio Luiz Mineiro pela confiança no trabalho, ao Dr. Éder e Dr. Rafael pelo suporte ao longo do desenvolvimento de todo o processo. Ao INPE por todo o suporte e oportunidade de desenvolvimento do projeto.*



## Referências

- ALVES, E. P. Junções de materiais dissimilares utilizando o processo de soldagem por fricção rotativa. 126 p. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - INPE, São José dos Campos/SP, 2010.
- ALVES, Eder Paduan et al. Otimização Empírica dos Parâmetros da Soldagem Por Fricção Rotativa Para Materiais Dissimilares. In: CONGRESS OF INDUSTRIAL MANAGEMENT AND AERONAUTICAL TECHNOLOGY, 4., 2017, São José dos Campos. Anais... , 2017.
- ALVES, Eder Paduan. Caracterização Mecânica e Estudo do Perfil Térmico na Soldagem por Fricção Rotativa de Materiais Dissimilares. 2016. 182 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais / Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2016.
- American Welding Society, Welding Handbook. 9ed. Miami: AWS, 2001.
- ASM Handbook, vol. 6, Welding, Brazing and Soldering. ASM, International 1993.
- BERDOVSKY, Yakov N.. Intermetallics Research Progress. Nova York: Nova Science Publishers, 2008.
- BREPOHL, Danielle Cristina de Campos Silva. Caracterização das Camadas Formadas no Processo de Galvanização à Quente Sobre Uma Chapa de Aço Livre de Intersticiais. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Ppgem, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- CALLISTER, William D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 7th. ed., 2007
- CANARIM, Rubens Chinali. Revestimentos de Fe-Al Depositados por Aspersão Térmica, Através da Reação In-Situ De Pós Elementares De Fe E Al. In: VI Seminário Da Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica - Unesp, 6., Bauru, 2012
- Haidara, F. et al., “Phase formation in Al–Fe thin film systems”, Intermetallics, Vol. 23, 2012, pp. 143–147
- KHAN, I. A. Experimental and numerical investigation on the friction 176 welding process. Thesis (Doctor of Mechanical Engineering) – Jawaharlal Nehru Technological University, India, 2011
- LÓPEZ, Facundo Sebastián. Montagem e Avaliação de uma Máquina de Solda por Fricção. 2010. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- MARQUES, Paulo; MODENESI, Paulo; BRACARENSE, Alexandre. Soldagem: fundamentos e tecnologia. 3º Edição. Belo Horizonte: UFMG, 2009.
- MEHRER, Helmut. Diffusion in Solids: Fundamentals, Methods, Materials, Diffusion-Controlled Processes. New York: Springer, 2007.



- MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem: fundamentos e tecnologia. 3. ed. Belo Horizonte/MG: Editora UFMG, 2005. 363 p.
- MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B.. Introdução à Metalurgia da Soldagem. 2012. 209 f. - Curso de Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Disponível em: Belo Horizonte, 2012.
- RATHOD, M.J.; KUTSUNA, M. Joining of aluminum alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding. Weld. J. v. 83-1, p. 16s-26s, 2004
- REED-HILL, Robert E. Princípios da Metalurgia Física. 2nd. ed., 1982
- ROSADO, Diego Belato. Análise de Microestruturas em Juntas Soldadas de Aços SAE 4140 e BS 4360 Através do Processo FHPP. 2009. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- SAUTHOFF, G. Intermetallics. Weinheim, New York, Basel, Cambridge, Tokyo.: VHC, 1995
- SHIZARDI, A. A. diffusion bonding aluminum alloys and composites: new approaches and modelling. Thesis (Doctor of Materials Science and Metallurgy) — University of Cambridge, England, 1997.
- SILVA, Ramsés Ferreira da. Caracterização da zona térmicamente afetada do aço produzido via resfriamento acelerado. 2010. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- TAVARES, Sheron Stephany. Soldagem Por Fricção Convencional Entre A Liga De Alumínio 6351-T6 E O Aço Sae 1020 Assistida Por Indução Eletromagnética. 2012. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELO, V. D. O. Soldagem: processos e metalurgia. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1992. 504 p.
- WANG, Wenshou; DAHL, Michael; YIN, Yadong. Hollow nanocrystals through the nanoscale Kirkendall effect. Chemistry of Materials, v. 25, n. 8, p. 1179-1189, 2013.