



International Conference for  
Academia and Industry Co-operation

20/11/2023 – 24/11/2023

São Luis - Maranhão - Brasil



International Meeting in Materials  
Science and Engineering of Maranhão

## ANÁLISE MICROESTRUTURAL E DE CICLO TÉRMICO DE UMA SOLDA EXECUTADA EM AÇO HIPOEUTETOIDE

### MICROSTRUCTURAL AND THERMAL CYCLE ANALYSIS OF A WELD PERFORMED ON HYPOEUTECTOID STEEL

**Luiz Gabriel da Silva Nascimento<sup>1</sup>, Mário Vinicius Machado da Silva<sup>2</sup>, Rafaela Mendes Rodrigues<sup>2</sup>, Marcos Murilo Soares de Souza<sup>3</sup>, Deibson Silva da Costa<sup>4</sup>**

*1- Professor de engenharia de Materiais Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Para (IFPA) Doutor em. Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do PA (UFPA). Belém, PA, Brasil*

*2 - Graduandos de Engenharia de Materiais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Para (IFPA), Belém, PA, Brasil.*

*3 - Graduando de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Para (UFPA), Belém, PA, Brasil.*

*4 - Professor de engenharia de Materiais da Universidade Federal do Para (UFPA) Doutor em. Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do PA (UFPA). Belém, PA, Brasil*

*autor<sup>1</sup>:luiz.nascimento@ifpa.edu.br*

### RESUMO

*A indústria automobilística aeroespacial e outras indústrias importantes utilizam a soldagem como o processo muito importante de fabricação e união de peças. A característica de uma solda é um elemento muito importante a ser estudado principalmente a zona termicamente afetada. Entender como esse processo ocorre e as características da estrutura soldada e as transformações existentes é muito fundamental. Portanto para esse trabalho foi utilizado um aço de baixo teor de carbono e uma solda a eletrodo revestido. Foram inseridos em pontos estratégicos termopares da solda a fim de mapear o ciclo térmico. Observou-se o aumento dos grãos na zona termicamente afetada e retirados os tempos críticos de cada ponto. Transformações físicas ocorreram no ponto no centro da solda, metalúrgicas no segundo que estava na zona termicamente afetada o pico do terceiro é pequeno apontando que não houve transformações na estrutura.*

**Palavras-chave:** *Processo de soldagem, Ciclo térmico, Analise microestrutural.*

### ABSTRACT

*The automobile industry, aerospace and other important industries use welding as the very important process of manufacturing and joining parts. The characteristic of a weld is a very important element to be studied, especially the thermally affected zone. Understanding how this process occurs and the characteristics of the welded structure and the existing transformations*

*is very fundamental. Therefore, for this work, low carbon steel and coated electrode welding were used. Thermocouples were inserted at strategic points in the weld in order to map the thermal cycle. The increase in grains in the thermally affected zone was observed and the critical times were removed from each point. Physical transformations occurred at the point in the center of the weld, metallurgical at the second, which was in the thermally affected zone, the peak at the third is small, indicating that there were no transformations in the structure.*

**Keywords:** *Welding process, Thermal cycle, Microstructural analysis.*

## INTRODUÇÃO

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (Shielded Metal Arc Welding- SMAW), também denominada como soldagem manual a arco elétrico (Manual Metal Arc - MMA) é um dos métodos mais empregados dentre os processos existentes, neste processo a soldagem é realizada a partir do calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça. O calor funde o metal do eletrodo e o seu revestimento, além do metal de base. O metal é depositado por meio de gotas ejetadas pelo metal fundido [1]. Um dos desafios no processo SMAW diz respeito a qualidade do cordão de solda nos aspectos de homogeneidade microestrutural, físico e dimensional.

Segundo [2] estas dificuldades devem-se principalmente ao processo ser predominantemente manual, uma vez que mesmo os melhores soldadores são incapazes de soldar com absoluta repetitividade e precisão. Mesmo com as desvantagens o processo é amplamente utilizado pelo baixo custo se comparado aos outros processos, além disso o equipamento para soldagem com eletrodo revestido é simples. Houve um aumento no uso de aços estruturais de média e alta resistência levando a uma exigência para consumíveis de soldagem adequados para esses materiais. Isso resultou em um avanço significativo na formulação de eletrodo para obter depósitos de solda com valores elevados de força e resistência [3].

O processo eletrodo revestido é amplamente utilizado por sua grande versatilidade e baixo custo, sendo considerado o processo de maior uso na indústria naval e offshore. Uma das técnicas existentes e utilizada no reparo das estruturas “offshore” é a soldagem subaquática molhada com eletrodos revestidos [4], [5], [6].

Existe uma estreita relação entre os parâmetros de soldagem e os ciclos térmicos que atuam sobre o cordão-de-solda. Os ciclos térmicos por sua vez, exercem forte influência sobre a microestrutura formada na junta soldada. A especificação adequada do ciclo térmico é também importante para se evitar o superaquecimento da região de solda, o que pode acarretar em comprometimento das propriedades mecânicas da junção. Durante a fusão do aço ocorre a formação de um grande número de compostos estáveis, notadamente os óxidos. Com a concentração de soluto e elevadas temperaturas os óxidos podem crescer e se tornarem sítios preferenciais para início da solidificação, agindo como substratos. Com a solidificação em andamento outras fases, menos estáveis, iniciam a sua formação e crescimento nos vazios interdendríticos. Com a continuidade do resfriamento obtém-se a transformação do ferro-delta em ferro-gama [7].

O resfriamento subsequente promove a decomposição da austenita em ferrita, cuja morfologia dependerá de como a nucleação e o crescimento se darão. Deste modo a nucleação da ferrita acicular também dependerá do processamento térmico empregado [7]. A região que envolve o cordão-de-solda normalmente apresenta uma microestrutura complexa, com variadas

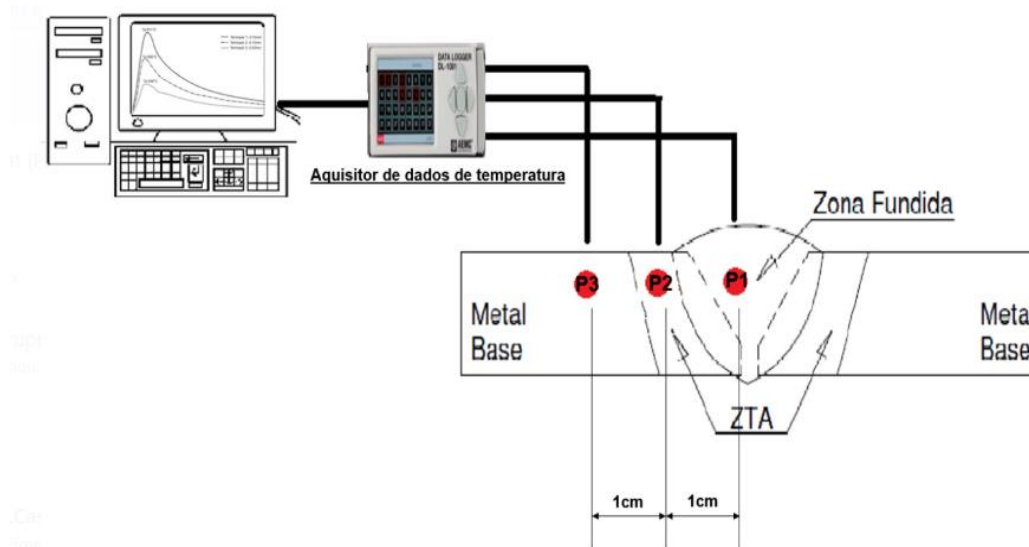
morfologias e fases dispersas, devido à elevada temperatura que levou à fusão de um volume de material proveniente tanto do metal de adição quanto do metal base. Considerando os efeitos do ciclo térmico na soldagem, a região de solda pode ser subdividida em 3 zonas [8]. Após a soldagem, o material apresenta o cordão de solda regiões bem definidas, são elas: zona termicamente afetada (ZTA), zona de ligação ou linha de fusão (LF), metal base (MB) e zona fundida ou metal de solda (MS).

Durante o resfriamento, alterações que ocorrem na zona fundida e na ZTA. Em relação à zona fundida, o metal líquido não é fortemente super-resfriado devido ao metal base ser aquecido até seu ponto de fusão, fazendo que o cordão de solda seja constituído predominantemente de grãos colunares e grosseiros. Na região da ZTA acontece uma distinção de três regiões características, com alterações diferentes na microestrutura, são elas: a região mais próxima da zona fundida que é chamada de região de crescimento de grão, onde ocorre a formação de grãos grosseiros; a região intermediária chamada de região de refino de grão, onde ocorre a formação de uma estrutura fina de ferrita e perlita; e a região mais próxima do metal base chamada de região intercrítica, onde apresentam mudanças 17 microestruturais cada vez menos perceptíveis [9]

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Processo de soldagem do material

O esquema apresentado na (Figura 1) exemplifica através de um fluxograma de como ocorreu a coleta dos dados para a confecção do ciclo térmico. Todas as informações térmicas foram apuradas por um transdutor e enviado a um computador no qual o software datalogger armazena esses dados para que possam ser tratados e analisado em forma de gráficos ou tabelas.



**Figura 1** - Fluxograma de como foram coletados os dados para a confecção do ciclo térmico

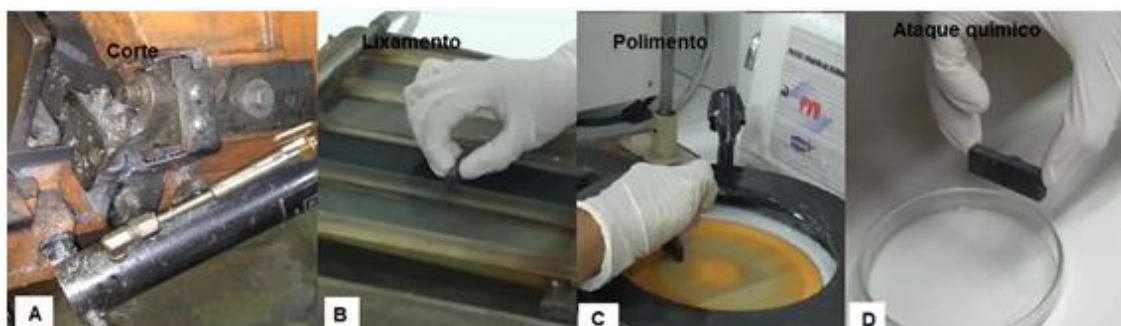
No processo de soldagem foi utilizado uma máquina de Solda Inversora Flama 161 Boxe com amperagem de 140A. Utilizado foi um eletrodo é 6013. A posição de solda utilizada é a 1G. Para isso foi acoplado 3 termopares em distância de 1 centímetro entre os 3 termopares, do centro do cordão de solda a fim de se extrair os dados térmicos e plotar os ciclos térmicos. A figura 2A, 2B e 2C mostram os instrumentos e mecanismos utilizados para o processo de soldagem.



**Figura 2** - instrumentos e mecanismos utilizados para o processo de soldagem

### Caracterização metalográfica

Para caracterizar a estrutura das zonas de solda foi realizado o processo metalográfico como corte, lixamento, polimento e ataque químico. Lixamento foi executado em lixadeira manual usando lixas de granulometrias de 100 até 1500 mesh. Para o polimento foi usado pano adequado e alumina de 0,25 micron. O ataque químico se deu por metal 5% em um tempo de 5 segundos. Logo após esse processo o corpo de prova foi levado para ser analisado no microscópio óptico e então obter as imagens. As figuras 3 abaixo mostram as etapas do processo metalográfico em sequência.



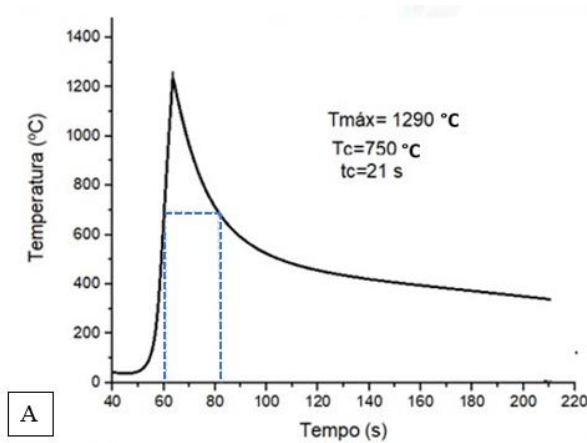
**Figura 3** – Etapas do processo metalográfico

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

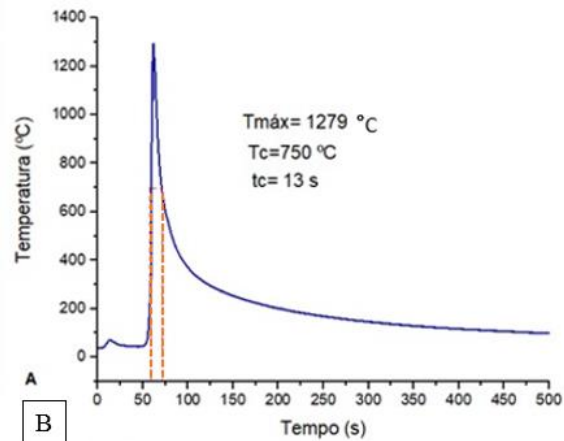
### Análise de ciclo térmico

O ciclo térmico da (Figura 4A) é o ciclo gerado a partir do ponto mais próximo ao centro do cordão de solda, o tempo de permanência na temperatura crítica é maior do que todos os pontos, possivelmente deve estar encontrado na zona fundida. A temperatura máxima do ponto crítico é de aproximadamente 1300 °C. A (Figura 4B) trata-se do ciclo térmico lotado para o ponto 2 onde observamos que a temperatura máxima atingida pelo ciclo térmico foi de 1279 °C. O tempo em que o material passou sofrendo transformação foi de 13 segundos para uma temperatura crítica de 750 °C. Podemos observar através do ciclo térmico que a transformação é muito rápida durante o processo de soldagem. Isso acontece pela transferência de calor uma vez que o material soldado estava a uma temperatura ambiente e isso leva o material da Poça de fusão a perder calor em direção ao material de base, com Gradiente de temperatura

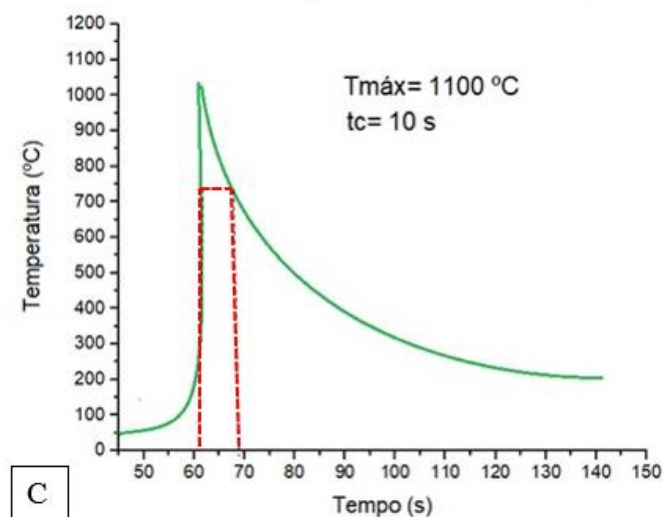
apontando para esse sentido. Para o ciclo térmico do ponto 3 (figura 4C) ao menor tempo de permanência de 10 segundos e uma temperatura máxima de 1100 °C esse ponto de temperatura máxima é o menor ponto de temperatura entre os três estudados nesse trabalho.



**Figura 4 – Gráfico do ciclo térmico P1**



**Figura 4 – Gráfico do ciclo térmico P2**

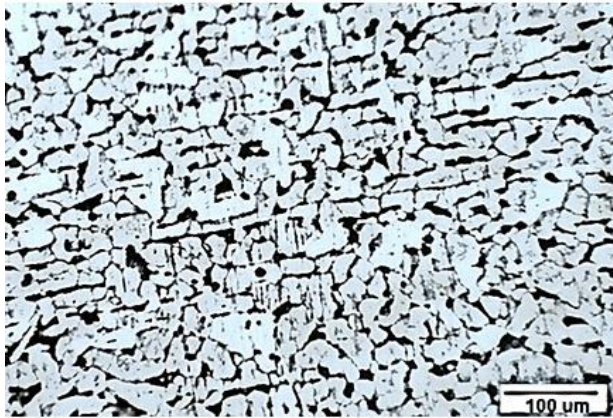


**Figura 4 – Gráfico do ciclo térmico P3**

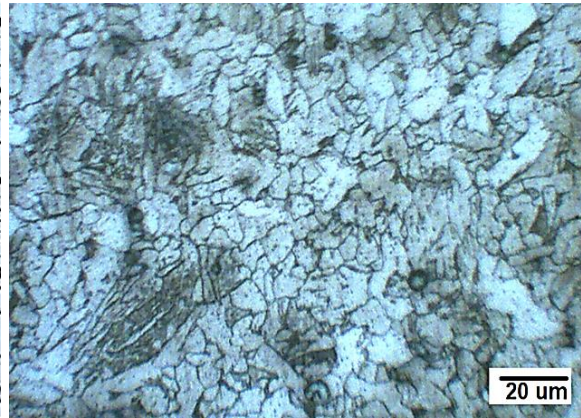
### Análise microestrutural

A figura 5 indica a chapa que passou pelo processo de soldagem, o material base é um aço hipoeutetóide, na análise da microestrutura observou-se ferrita (região clara) e cementita entre os contornos de grãos. A estrutura mostrada na figura 6 é da zona termicamente afetada, próxima a poça de fusão trata-se de pequenos grãos em formato agulhado, chamada de ferrita acicular. É uma estrutura presente em alguns aços caracterizada por grãos pequenos em formato agulhado. Pode ser vantajosa sobre outras microestruturas por causa da sua ordenação caótica que aumenta a resistência. Essa zona é quimicamente igual ao material de base, no entanto há uma grande mudança na estrutura após o processo de soldagem mostrando uma estrutura mais refinada. Portanto possivelmente mais endurecida. Isso se dá ao fato de que com uma corrente de 140 amperes, teremos um pico térmico elevado. O resultado desse aumento de temperatura em conjunto com o resfriamento brusco no qual impede a difusão atômica resulta

em uma estrutura menos dúctil.

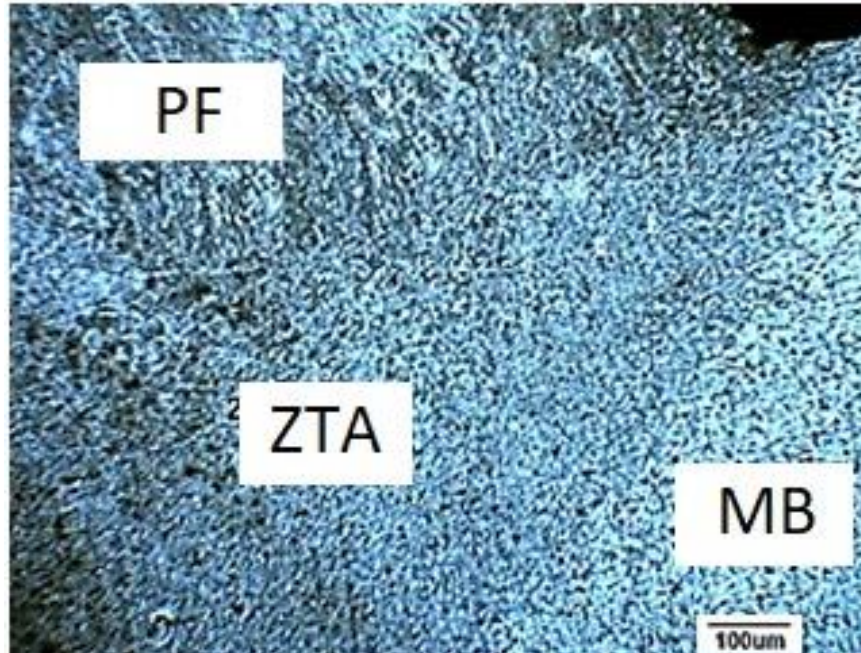


**Figura 5 – Microestrutura da chapa soldada**



**Figura 6 – Microestrutura da ZTA**

A ZTA é a zona compreendida entre a poça de fusão e o material de base. Quanto maior essa zona e quanto mais tempo ela tiver sobre ação de uma temperatura crítica, mudanças bruscas poderão ocorrer na sua estrutura. A figura 7 mostra as três zonas que estão incluídas em um processo de soldagem, nessa figura é possível observar os grãos da poça de fusão direcionados, essa por sua vez recebeu o calor da região fundida a que foi a poça de fusão. Os grãos da zona termicamente afetada são visivelmente mais refinados do que do material de base, isso implica em durezas elevadas, e o material mais frágil o que pode ser danoso a essa zona, devido à concentração de tensões elevadas. Muitas vezes nesse caso a solda precisa passar por um tratamento térmico para aliviar essa tensão.



**Figura 7 - Três zonas que estão incluídas em um processo de soldagem**

## CONCLUSÕES

Com os procedimentos adotados neste trabalho e os resultados obtidos mostram de acordo com os ciclos térmicos obtidos, que quanto mais afastado do centro do cordão de solda há uma

diminuição do tempo crítico, qual o material passa a uma temperatura de transformação de sua estrutura. Além disso observa-se uma maior temperatura máxima para quando os termopares estão mais próximos ao centro do cordão de solda. Com um aporte térmico elevado, a zona termicamente afetada obteve considerável refinamento, e uma estrutura acicular, que possui boas propriedades mecânica. O material de base e um aço de baixo teor de carbono hipoeutetóide com fases de ferrita e microconstituintes perlita.

## REFERÊNCIAS

- [1] MIRANDA, Rafael Santos. Monitoramento de cordão de Solda MIG/MAG. Brazilian Journal of Business, v. 2, n. 3, p. 1807-1872, 2020.
- [2] LIMA, Eduardo José. BRACARENSE, Alexandre Queiroz. Arc Welding Automation, Arc Welding, Wladislav Sudnik, IntechOpen, DOI: 10.5772/27714, 320p. 2011.
- [3] SURIAN, E.; DE RISSONE, M. Ramini; DE VEDIA, L. Influence of molybdenum on ferritic high-strength SMAW All-Weld-Metal properties. Welding journal, v. 84, n. 4, p. 53s-62s, 2005.
- [4] LIBERATO, Frank de Mello; MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. Aspectos Operacionais da Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodos Revestidos Inoxidável Austenítico. Soldagem & Inspeção, v. 23, p. 277-291, 2018
- [5] URIBE, Andrés Mauricio Moreno *et al.* Influência da polaridade sobre a estabilidade do processo de soldagem subaquática molhada com eletrodo revestido. Soldagem & Inspeção, v. 22, p. 429-441, 2017.
- [6] REPPOLD, R. *et al.* Perspectivas e desafios para aplicação da soldagem subaquática molhada na petrobras. Rio Welding, v. 1, p. 1-15, 2014.
- [7] DA SILVA, Ramsés Ferreira. Caracterização da zona termicamente afetada de aço produzido via resfriamento acelerado. 2010.
- [8] DALLAN, C. B.; DAMKROGER, B. K. Characterization of welds. In: DAVIS, J.R. et al.(Ed.).ASM handbook: Welding, Brazing, and Soldering. Metals Park; American Society for Metals, 1993.p.202-209.
- [9] MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BACARENSE, Alexandre Queiroz. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. 3. ed. Belo Horizonte: Ufmg, 2009