

O ESTUDO DOS EFEITOS DOS CICLOS TÉRMICOS NO PROCESSO DE SOLDAGEM ELETRODO REVESTIDO E7018 NO AÇO SAE 4140.

Edilon de Oliveira França, Rener Washington Mariano dos Santos, Renan Rodrigues de Faria, Marco Antônio Aires Pereira Ribeiro, Jose Rubens de Camargo, Maria Silvia Almeida de Souza França

Fatec Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba, Rod. Ver. Abel Fabrício Dias, 4010 - Água Preta, Pindamonhangaba - SP, 12445-010-SP, Brasil, edilon.franca@fatec.sp.gov.br, rener.santos@fatec.sp.gov.br, renan.faria@fatec.sp.gov.br, marco.ribeiro@fatec.sp.gov.br, jose.camargo7@fatec.sp.gov.br, maria.franca4@fatec.sp.gov.br

Resumo

Este trabalho teve como objetivo estudar os efeitos que o pré-aquecimento e o pós-aquecimento de uma solda de revestimento com eletrodo revestido E7018 de 2,5 mm. Para realizar este trabalho, foram utilizadas 9 chapas de aço 4140 com duas replica para cada condição, com as seguintes dimensões: 8,6 x 35 x 101mm e identificadas como CP1 solda de revestimento sem pré-aquecimento, CP2 com pré-aquecimento e CP3 com pré-aquecimento e pós-aquecimento. Para analisar o comportamento de cada condição estudada, foi realizado ensaio de dureza, macrografia e micrografia da solda, Zona Térmica Afetada (ZTA) e Metal de Base (MB). Conclui-se que o CP2 apresentou maior penetração e diluição. Essa condição foi a que teve maior energia de soldagem, indicando que a penetração é influenciada pela energia de soldagem e aquecimento. Analisando a dureza do metal base e a solda das três condições estudadas, estão com valores de dureza muito próximos, e na ZTA o CP 3 apresentou menor valor de dureza. Quando comparado às microestruturas, o CP3 é o que apresentou Bainita revenida, sendo uma estrutura com menor tensionamento quando comparado com as anteriores.

Palavras-chave: Dureza. Bainita Revenida. Macrografia. Micrografia.

Área do Conhecimento: Engenharia de Materiais e Metalúrgica

Introdução

A soldagem consiste na união permanente entre materiais, realizada por meio da aplicação localizada de calor, com ou sem o uso simultâneo de pressão e/ou material de adição. A junção obtida ao final do processo é denominada solda. (Wainer; Brandi; Mello, 2011).

Dentre os principais processos de soldagem utilizados na indústria, destacam-se: Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (SMAW: *Shielded Metal Arc Welding*), Soldagem MIG/MAG (GMAW: *Gas Metal Arc Welding*) e Soldagem TIG (GTAW: *Gas Tungsten Arc Welding*) (Santos, 2018).

A soldagem com eletrodo revestido, onde temos uma alma metálica de aço carbono e o revestimento, a corrente elétrica é conduzida pela alma metálica do porta-eletrodo até a peça, que gera um arco elétrico como fonte de calor, que é suficiente para fundir a alma metálica e queimar o revestimento, que gera o gás que protege a poça de fusão e da resistência mecânica à solda (Santos, 2025).

Em aços ligados ou com teor de carbono alto, ao se realizar o processo de soldagem, algum cuidado deve ser tomado, para que a integridade da solda e do metal de base seja pouco afetada durante o processo de soldagem. Desta forma, se faz necessário controlar a velocidade de resfriamento durante o processo, realizando um pré-aquecimento e pós-aquecimento no metal de base (Basto; Augusto, 2024).

Para realizar o pré-aquecimento no aço, deve-se levar em consideração o carbono equivalente da liga e a espessura. O principal objetivo do pré-aquecimento é evitar uma perda rápida de calor, permitindo que o aquecimento causado pelo arco elétrico não sofra um resfriamento brusco. Isso é essencial para impedir transformações estruturais indesejadas no aço, que poderiam comprometer suas propriedades mecânicas (Castro; Pinheiro, 2017).

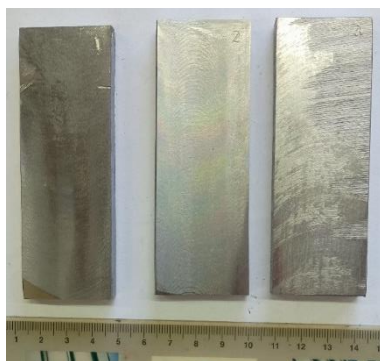
O pós-aquecimento na soldagem é aplicado após a execução da junta, com o objetivo de resfriar o material de forma controlada, evitando transformações indesejadas na zona afetada pelo calor e reduzindo o risco de trincas por hidrogênio. Esse processo é essencial para garantir a integridade da solda e deve seguir normas técnicas, como as da ASME e AWS, que determinam os parâmetros conforme o tipo de material e as condições do processo (Castro; Pinheiro, 2017).

Este trabalho teve como objetivo estudar os efeitos que o pré-aquecimento e o pós-aquecimento de uma solda de revestimento na posição plana com eletrodo revestido E7018 em chapa de aço SAE4140 causam na dureza, microestrutura da solda, Zona Térmica Afetada (ZTA) e Metal de Base (MB).

Metodologia

Para realizar este trabalho, foram utilizadas 9 chapas de aço SAE4140 com duas replica para cada condição, com as seguintes dimensões: 8,6mm x 35mm x 101mm, composição química ilustrada na Tabela 1 e identificadas como CP1 solda de revestimento sem pré-aquecimento, CP2 com pré-aquecimento e CP3 com pré-aquecimento e pós-aquecimento. As chapas foram lixadas para retirar o óxido, como está ilustrado na Figura 1.

Figura 1 Corpos de prova do aço SAE 4140.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O processo de soldagem utilizado foi eletrodo revestido com eletrodo E7018 de diâmetro de 2,5 mm, solda de revestimento na posição plana, com a fonte marca Miller modelo Dynasty 200.

Tabela 1 Composição química peso em porcentagem.

C	Mn	Mo	Cr	Ni	V	Cu
0,41	0,85	0,22	1,06	0,07	0,01	0,06

Fonte: Dias (2024).

Os parâmetros que foram utilizados neste processo de soldagem estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 Parâmetros de soldagem.

Parâmetros de Soldagem	CP1	CP2	CP3
Velocidade de solda [mm/s]	2,47	2,45	2,46
Amperagem [A]	100	100	100
Voltagem [V]	16	16	16
Taxa de deposição [kg/h]	0,814	0,781	0,796

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O cálculo de pré-aquecimento e pós-aquecimento foi utilizado a equação 1 de carbono equivalente e a Tabela 1 de composição química e depois a equação 2 para determinar a temperatura mínima do pré-aquecimento e máxima, que são respectivamente 273°C a 423°C. A temperatura adotada para realizar o processo de soldagem, a temperatura de pré-aquecimento foi de 320°C e o pós-aquecimento de 450°C. O aquecimento do pré e pós-aquecimento foi utilizado um maçarico oxiacetileno e, para medir a temperatura, foi utilizado um termômetro digital de contato.

$$Ceq = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + Cu}{15} \quad (1)$$

$$TP_{min} = 350 * \sqrt{Ceq * (1 + 0,005E)} - 0,25 \quad (2)$$

$TP_{max} = TP_{min} + 150^{\circ}C$ onde: E= espessura da chapa TP_{max} = temperatura máxima de pré-aquecimento TP_{min} = temperatura mínima de pré-aquecimento.

Após realizar cada condição de soldagem e as peças resfriarem calmamente ao ar, as mesmas foram levadas para o laboratório de metalografia, onde foi realizado um corte no centro da chapa e retirada uma amostra de 15 mm de comprimento. Utilizando cortadeira metalográfica marca Teclago, modelo CM80, cada amostra foi identificada novamente e se iniciou o lixamento na Lixadeira marca Arotec, modelo Duopol. Com a seguinte sequência de lixas: 180, 220, 400, 600 mech, para realizar a macrografia de cada amostra.

Na sequência, as amostras foram levadas para o laboratório de química, onde na capela foi realizado o ataque químico com Nital 15% com a finalidade de revelar o contorno da solda, e em seguida secadas a amostra utilizando Secador marca Tayff. E as mesmas foram analisadas no estereoscópio marca Olympus Modelo 5z2-et e retiradas as imagens para medir a profundidade e fazer o cálculo de diluição.

Após realizar a macrografia, as amostras foram levadas à lixadeira de 600 mesh para remover o ataque químico e iniciada uma sequência de lixamento 600, 800, 1000, 1200 e 1500 e depois polimento com alumina de 0,3 μm . Foi realizado o ataque químico com Nital 3% e capturadas as imagens de cada condição estudada no microscópio marca Olympus modelo BX.

Na sequência, foram levadas as amostras ao laboratório de ensaios mecânicos e realizada a dureza na escala Rockwell A. (Cone de diamante de 120° e carga de 60 kgf/mm²) utilizado o durômetro marca Panantec modelo RASN Analógico. A metodologia utilizada para medir a dureza foi realizar 3 medições no metal base lado A e lado B, 3 medições na ZTA e 3 medições na solda.

Resultados e Discussão

Ao analisar a Tabela 3, pode-se observar que o CP 2 apresentou uma diluição cerca de 9% maior que o CP1 e 2% em relação ao CP 3, e o mesmo foi que apresentou a maior energia de soldagem e realizado pré-aquecimento, demonstrando que o pré-aquecimento e a energia de soldagem foram determinantes no aumento da diluição e maior penetração, como visto em trabalho semelhante de Santos (2025).

Tabela 3 Diluição, Penetração e Heat Input.

	CP1	CP2	CP3
Área Superior (mm ²)	12,506	19,758	16,626
Área Inferior (mm ²)	17,630	19,078	17,379
Área Total (mm ²)	30,136	38,836	34,005
Diluição (%)	42	51	49
Heat Input (J/mm)	421	424	423
Penetração (mm)	2,26	2,60	2,59

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Ao analisar a Tabela 4, a região de solda das 3 condições estudadas, os valores estão muito próximos, e na ZTA o CP 3 apresentou cerca de 6% menor em relação ao CP 2 e cerca de 7% em relação ao CP1, demonstrando que o pré-aquecimento teve uma redução na dureza, mas o pré-aquecimento junto com o pós-aquecimento se mostrou mais eficiente, tendo a maior redução em todas as medições da região da solda. E pode observar que o metal de adição E7018 apresentou os valores de dureza bem próximos ao metal de base, indicando que é adequado para solda, como também visto em trabalho similar de Nazaré (2022).

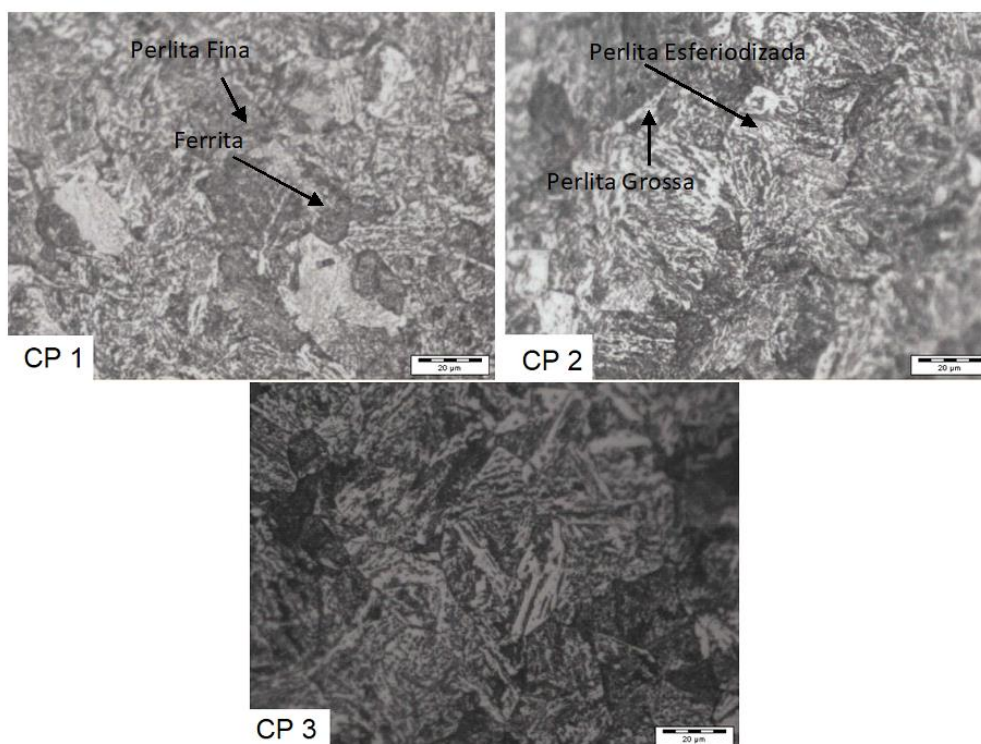
Tabela 4 Dureza dos Corpos de Prova.

	CP01			CP02			CP03		
MEDIDAS	MB	SOLDA	ZTA	MB	SOLDA	ZTA	MB	SOLDA	ZTA
1	61	66	67	60	64	66	60	63	62
2	60	64	66	60	65	65	60	63	62
3	61	60	67	59	64	66	59	64	60
MÉDIA	61	65	67	60	64	66	60	63	62
DP	0,47	0,4	0,3	0,47	0,23	0,3	0,47	0,47	0,25
MB INICIAL		62			62			62	

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Ao observar a Figura 2, a Metal Base da solda (MB) pode-se visualizar a presença de Ferrita, Perlita fina, grossa e Perlita esferoidizada, também observado em trabalho similar de Silva; Sotero (2025).

Figura 2 Metal Base das condições estudadas CP1 soldagem, CP2 soldagem com pré-aquecimento, CP3 soldagem com pré-aquecimento e pós-aquecimento.

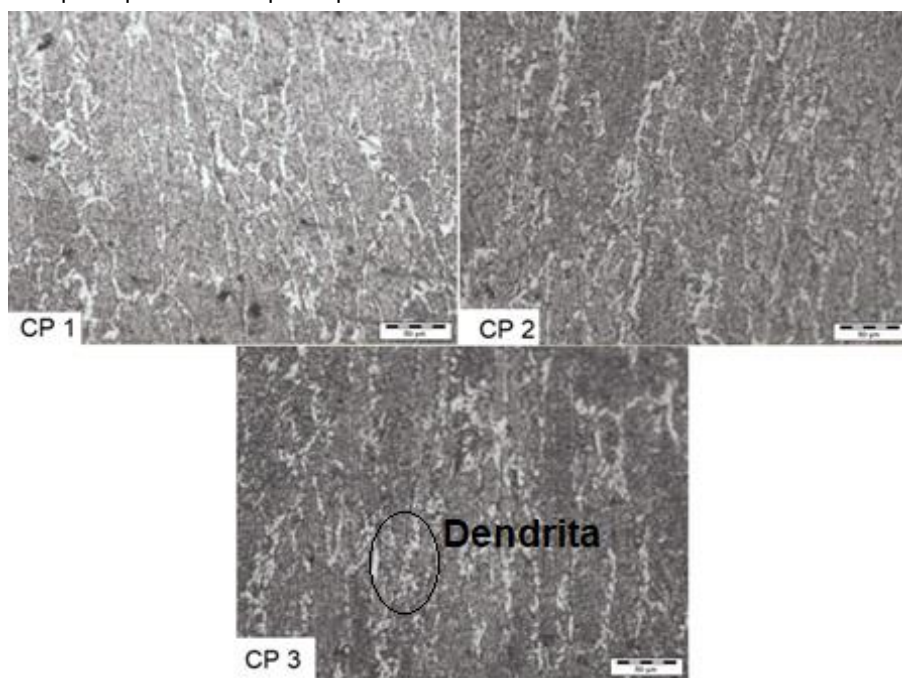


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 3, foi observada a presença da estrutura Dendrita e Ferrita, que são características da região de solda e também observadas em trabalho similar por Nazaré (2022).

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

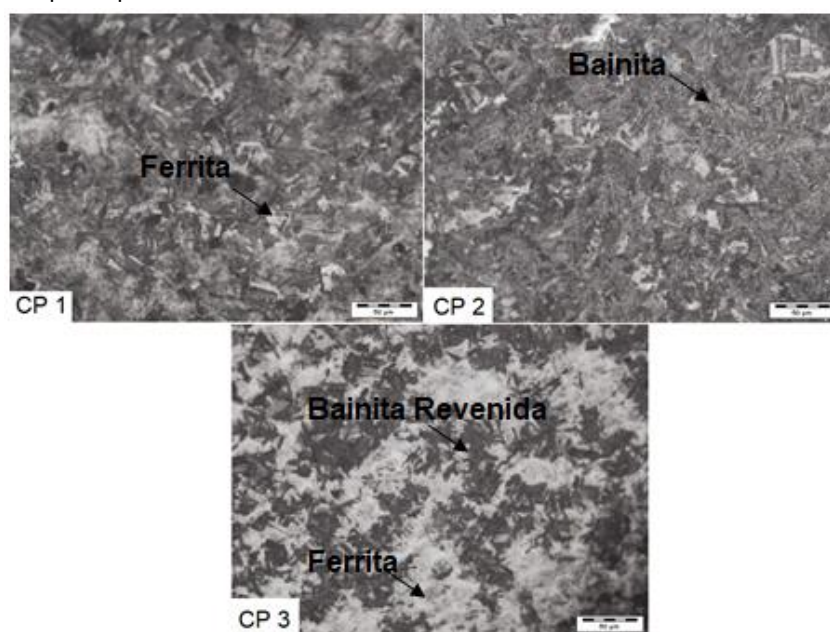
Figura 3 - Macrografia da reigão soldada CP1 soldagem, CP2 soldagem com pré-aquecimento, CP3 soldagem com pré-aquecimento e pós-aquecimento.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Já na Figura 4, pode ser observado no CP 1 e CP2, a presença de estrutura de Ferrita e Bainita bem fechada e muito semelhante e no CP3 a Bainita está revenida devido ao calor do pós-aquecimento, onde a Ferrita é mais visível, indicando que a dureza está mais baixa que os demais, também observado no trabalho similar de Isquierdo (2022).

Figura 4 Micrografia da ZTA CP1 soldagem, CP2 soldagem com pré-aquecimento, CP3 soldagem com pré-aquecimento e pós-aquecimento.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Conclusão

Conclui-se que o CP 2 apresentou uma diluição cerca de 9% maior que o CP1 e 2% em relação ao CP 3, e o mesmo foi que apresentou a maior energia de soldagem e realizado pré-aquecimento, demonstrando que o pré-aquecimento e a energia de soldagem foram determinantes no aumento da diluição e maior penetração. Comparando com a dureza do metal base, a solda das três condições estudadas está com valores de dureza muito próximos, e na ZTA o CP 3 apresentou menor valor de dureza. Quando comparado às microestruturas, o CP3 é o que apresentou Bainita revenida, sendo uma estrutura com menor tensionamento quando comparado com as anteriores.

Desta forma, ao analisar as três condições estudadas, o CP3 com pré e pós-aquecimento obteve os melhores valores de dureza e estrutura Bainita revenida, na região da ZTA, melhorando a qualidade da solda, e o CP2, que teve somente o pré-aquecimento, ficou com os valores intermediários e o mesmo teve um ligeiro aumento na penetração e diluição comparado com o CP1. Esse procedimento melhora o tensionamento, mas favorece o aumento da diluição e penetração.

Referências

BASTO, J.E.; AUGUSTO, D. R. A. **Estudo do Efeito de Preaquecimento no Aço 1045 no Processo GMAW**. 2024. 46p. Trabalho de Graduação (Curso de Mecânica em Processos de Soldagem). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2024.

CASTRO, J. N.; PINHEIRO, B. R.; M. M. F., **Estudo da Variação da DBCP e do Ângulo de Soldagem em Corrente Pulsada, Curto Circuito Convencional e Curto Circuito Controlado em Soldagem MIG/MAG** 72º Congresso Anual da ABM, Internacional e ao 17º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 06 de outubro de 2017, São Paulo, SP, Brasil.

DIAS, G. **Certificado de Qualidade Revendedor de Aço**. Certificado de qualidade numero 725859 emitido no dia 02/02/2024. Santo Amaro. São Paulo. 2024.

ISQUIERDO, D.V.; FRANÇA, E.O; BERTHOUD, E. G.; SANTOS, R. W. M.; PEREIRA, S. A. V.; MONTORO, S. R **Análise da Soldagem por Eletrodo Revestido no Aço ASTM A36 Variando a Técnica Empurrando e Puxando**. XXVI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XXII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e XII Encontro de Iniciação à Docência - Universidade do Vale do Paraíba – 2022.

NAZARÉ, V. D. M. **Estudo da Profundidade e Diluição do Aço A36 com a Variação da Inlinação do Ângulo da Tocha no Processo MIG (GMAW)**. 2022. 46p. Trabalho de Graduação (Curso de Tecnologia em Processos Metalúrgicos). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2022.

SANTOS, C.E. F. **Processos de Soldagem – Conceitos, equipamentos e normas de segurança**. Editora: Érica; 1ª edição (10 julho 2018).

SANTOS, L. R. N. **Estudo dos Efeitos dos Ciclo Térmicos no Aço 1045 - Soldagem MIG/MAG**. 2025. 45p. Trabalho de Graduação Curso de mecânica -processos de soldagem. Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2025.

SILVA, W. L. C.; SOTERO, E. C. **Estudo Recuperação de Dentes da Coroa Dentada com Processo de Soldagem MIG/MAG**. 2025. 54p. Trabalho de Graduação Curso de mecânica -processos de soldagem. Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2025.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem Processos e Metalurgia**, 2 ed. São Paulo. Editora Edgard Blücher, 2019.