

IMPACTO DA SOLDAGEM MAG E DO PRÉ-AQUECIMENTO NA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO 22MnB5 + NbMo DE 7 MM DE ESPESSURA ENDURECIDO POR PRESSÃO

Mauricio Heberle ⁽¹⁾ (mauricioheberle1587@hotmail.com), Carlos Pérez Bergmann ⁽¹⁾ (bergmann@ufrgs.br),
Cintia C. Petry Mazzaferro ⁽²⁾ (cintia.mazzaferro@ufrgs.br), Deocleber J. Radke Padilha ⁽³⁾
(deocleber.padilha@bruning.com.br)

⁽¹⁾ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); PPGE3M

⁽²⁾ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); DEMEC

⁽³⁾ Bruning Tecnometal; Pesquisa & Desenvolvimento

RESUMO: *A utilização dos aços estampados a quente 22MnB5 de alta espessura em carrocerias de veículos de transporte de cargas tornou-se uma tendência devido à elevada resistência adquirida após o processo de endurecimento, habilitando o uso de chapas mais finas e, conseqüentemente, contribuindo para maior eficiência energética dos veículos e menores emissões de CO₂. No entanto, a soldagem desses aços é mais complexa, devido a microestrutura predominantemente martensítica resultante do processo de estampagem a quente, além da possível presença de trincas induzidas por hidrogênio. Para mitigar esses problemas, o pré-aquecimento na soldagem apresenta-se como solução, já que permite a efusão do hidrogênio e alivia as tensões residuais no material. Com o objetivo de avaliar o impacto do ciclo térmico e da temperatura de pré-aquecimento na microestrutura desse material, foram soldadas chapas do aço 22MnB5 + NbMo estampado a quente, de microestrutura predominantemente martensítica, pelo processo de soldagem MAG pulsado, sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento de 50, 120 e 210°C. Os resultados evidenciaram que o material pré-aquecido a 50°C obteve a maior resistência e uma razoável ductilidade, enquanto os materiais pré-aquecidos a 120 e 210°C tiveram redução na resistência e aumento substancial no alongamento, proporcional ao aumento da temperatura.*

PALAVRAS-CHAVE: AÇO 22MNB5, MARTENSITA, SOLDAGEM, PRÉ-AQUECIMENTO

IMPACT OF MAG WELDING AND PRE HEATING ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE 7MM THICKNESS 22MnB5 + NbMo PRESS HARDENED STEEL

ABSTRACT: *The usage of high-thickness 22MnB5 steel in the vehicle industry for cargo transport has been a trend due to the high resistance acquired after being press hardened, enabling thinner plates than usual and, consequently, contributing to greater energetic efficiency and less CO₂ emissions. On the other hand, welding this steel can be quite complex, since the microstructure obtained after the hot stamping process is predominantly martensitic, and the steel also becomes susceptible to hydrogen induced cracks. In order to prevent this from happening, the preheating before welding presents as a possible solution, as it allows the effusion of hydrogen and also relieves the residual tensions on the material. With the goal of evaluating the impact of the thermal cycle and the preheating temperature on the microstructure of this material, plates of 22MnB5 + NbMo hot stamped steel, with a predominantly martensitic microstructure, were welded using the pulsed MAG welding process, without any preheating and with preheating of 50, 120 and 210°C. The results showed that the material preheated to 50°C obtained the highest strength and reasonable ductility, while materials preheated to 120 and 210°C had a reduction in strength and substantial increase in elongation, proportional to the increase in temperature.*

KEYWORDS: 22MNB5 STEEL, MARTENSITE, WELDING, PRE HEATING

1. INTRODUÇÃO

O aço 22MnB5 é um material bastante empregado quando se deseja obter formas complexas e alta resistência, o que é bastante comum na indústria automotiva (Chen *et al.* 2014). Outro setor que vem se destacando no uso desse material é o setor de transporte de carga, pois através da utilização desses materiais de mais elevada resistência, chapas de menor espessura podem ser utilizadas na fabricação dos caminhões e conseqüentemente o peso final da estrutura será menor, o que resulta em uma maior capacidade de carga, de modo que as emissões de CO₂ são reduzidas (ArcelorMittal, 2022; Mohrbacher, 2016). Com quantidades mínimas de 0,0015% em massa de boro (B) em sua composição, o aço 22MnB5 possui uma excelente temperabilidade o que permite que o aço seja temperado durante o processo de estampagem à quente (Venturato *et al.* 2017). O material 22MnB5 na sua condição de entrega, dependendo do processo de fabricação utilizado, é geralmente formado por uma microestrutura ferrita-perlita, com durezas em torno de 200 HV, limite de resistência superiores a 500 MPa e alongamento a partir de 20% (Cavusoglu *et al.* 2020), mas é na sua condição depois de temperado que o material atinge propriedades mecânicas interessantes.

Quando aquecido a temperaturas acima de 900°C, o aço 22MnB5 possui uma microestrutura totalmente austenítica, de baixa resistência e excelente conformabilidade, o que é ótimo para realizar a estampagem de formas complexas, ainda mais se tratando de espessuras grossas (Naderi, 2007; Chang *et al.* 2011). O processo de estampagem a quente consiste em elevar a temperatura do material acima da linha A3, realizar a conformação e ainda com o material dentro da prensa, realizar a tempera do aço através de uma ferramenta refrigerada (Turetta, 2008). A microestrutura final do aço após o processamento será predominantemente martensita auto-revenida, podendo adquirir durezas acima de 400 HV, limite de resistência superiores a 1400 MPa e alongamento de 5% (Chang *et al.* 2020).

Estudos mostram que o emprego de nióbio (Nb) e molibdênio (Mo) nesse aço, tem principalmente a função de realizar um refinamento na microestrutura, limitando o crescimento do grão pré-austenítico (Jo *et al.* 2020) 2, permitindo dessa forma a utilização de temperaturas de austenitização um pouco mais altas, o que facilita a transferência do aço do forno para a prensa sem perda considerável de temperatura, o que poderia impactar na austenitização e conseqüentemente no posterior processo de endurecimento.

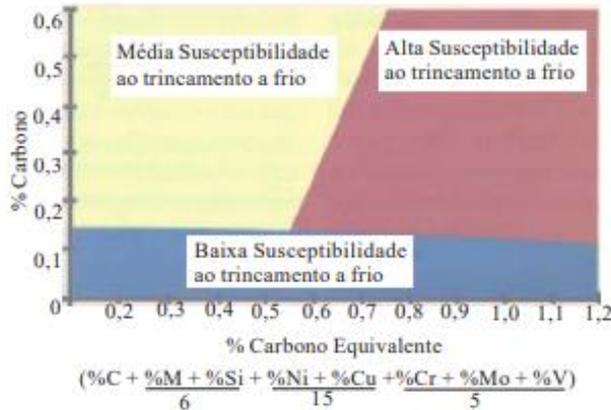
A soldagem de aços martensíticos é sempre motivo de preocupação, isso por que uma microestrutura martensítica é geralmente muito frágil e a formação de trincas durante e depois da soldagem pode ocorrer. Os aços martensíticos são muito importantes e de grande utilização na indústria, pois possuem elevada resistência, com elevados limites de escoamento e limite elástico (Shibata *et al.* 2019).

A relação entre o LE/LR dos aços martensíticos é em torno de 0,9, o que é um sinal de alerta para esses aços, já que as tensões residuais causadas pela soldagem são da ordem da tensão de escoamento do material, como no caso dos aços martensíticos elas são bastante próximas do limite de ruptura, isso quer dizer que qualquer tensionamento externo pode levar o material a trincar (Araújo, 2013).

Outro dificultante na hora da soldagem é o teor de carbono e os elementos de ligas presentes no material. A Figura 1 apresenta um gráfico que mostra a susceptibilidade do material ao trincamento a frio em função do teor de carbono e os elementos de liga, calculado através da equação do carbono equivalente (ASM Handbook, 1993^a). Geralmente, aços martensíticos possuem

elevado carbono e elementos de liga, o que melhora a sua temperabilidade e dureza final do material, mas acaba por diminuir a soldabilidade.

FIGURA 1. Susceptibilidade ao trincamento a frio em função da relação do teor de carbono e o carbono equivalente.



Fonte: ASM Handbook (1993^b).

Existem alguns procedimentos a fim de facilitar a soldagem de aços martensíticos como, por exemplo, evitar a utilização de processos de soldagem com aporte de calor muito elevado, pois caso contrário as juntas irão perder resistência mecânica devido a transformações de fases, e auto-revenimento, além de um crescimento de grão excessivo na ZTA. O controle da entrada de hidrogênio na poça de fusão proveniente tanto do metal de adição quanto do meio ambiente também é de extrema importância (Lancaster, 1999). Outro fator de grande relevância na soldagem de aços martensíticos é o emprego do pré-aquecimento, que nesse caso não pretende evitar a formação de martensita, como em aços com microestrutura ferrítica-perlítica, mas sim realizar um alívio no tensionamento durante a transformação dessa microestrutura durante a soldagem (ASM Handbook, 1993^c). A definição da temperatura de pré-aquecimento é muito importante, pois dependendo do efeito desejado, temperaturas muito elevadas podem ser prejudiciais ao aço, reduzindo substancialmente a sua resistência. A utilização da norma ISO EN 1011-2 pode auxiliar na correta determinação da temperatura de pré-aquecimento para a soldagem de aços com boro na composição.

1. MATERIAIS E MÉTODOS

1.1 Material

O material utilizado neste trabalho é o aço 22MnB5 com adições de nióbio (Nb) e molibdênio (Mo), com 7 mm de espessura e estampado a quente. Esse material faz parte da classe de aços chamada de “aços endurecidos por pressão” (do inglês, *Press Hardening Steels* - PHS). Sua composição química está presente na Tabela 1.

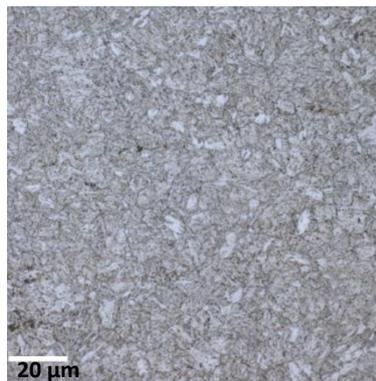
O aço em questão foi aquecido a 950°C por 6 minutos e então conformado em uma ferramenta refrigerada a uma taxa de resfriamento superior a 27°C/s, o que lhe garantiu uma microestrutura predominantemente martensítica auto-revenida, como pode ser visto na Figura 2.

TABELA 1. Composição química do material 22MnB5 + NbMo fornecido pela SSAB.

Composição química do aço 22MnB5 (% em massa)													
C	Si	Mn	P	S	Al	V	Ti	Cu	Cr	Ni	Mo	Nb	B
0,211	0,2	1,14	0,008	0,002	0,039	0,006	0,032	0,017	0,2	0,03	0,151	0,04	0,0018

Fonte: SSAB (2018).

FIGURA 2. Microscopia ótica do aço 22MnB5 + Nb e Mo estampado a quente.



Fonte: Autor (2022).

O material após estampado adquiriu uma dureza média de 443 HV ao longo de toda sua espessura. O limite de resistência, limite de escoamento e o alongamento é de 1465 MPa, 1075 MPa e 10,26%, respectivamente.

O metal de adição utilizado foi o X70-IG de 1,2 mm de diâmetro da marca Böhler, com limite de resistência de 900 MPa e alongamento igual a 19%, cuja classificação é definida pela norma AWS A5.28 é ER110S-G, o qual trata-se de um arame sólido, para a soldagem de aços de elevada resistência mecânica, tratados termicamente, com limite de escoamento de no mínimo 690 MPa. A definição do arame de solda na soldagem de aços martensíticos é de grande importância, pois geralmente nenhum deles irá atender os limites de resistência que o material base possui, então é necessário selecionar o arame com características mais próximas possíveis. O requisito de resistência máxima encontrada em arames normatizados pela AWS é de 120 ksi (ou 827,37 MPa), ou seja, para valores superiores a esse, é necessário desenvolver arames de solda especiais para aplicações específicas. A composição química do arame utilizado está presente na Tabela 2.

TABELA 2. Composição química do arame de solda X 70-IG - Böhler.

Composição química do arame de solda X 70-IG (% em massa)						
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
0,1	0,6	1,6	0,25	1,3	0,25	0,1

Fonte: Böhler (2022).

1.2 Processamento

As chapas foram soldadas pelo processo MAG pulsado de forma robotizada através de um robô de solda da marca Yaskawa Motoman, modelo EA14000N, conectado a uma fonte de soldagem sinérgica da marca Fronius, modelo TPS 500. O tipo de junta foi a topo de chanfro reto e a posição de soldagem 1G – Plana. O gás de proteção foi o C10 (10%CO₂ + 90% Ar) e a vazão foi de 15 l/min. A corrente utilizada foi de 260 A (corrente contínua/CC+) e a tensão 24,5 V. A velocidade de soldagem foi de 380 mm/min. O aporte térmico na soldagem foi de aproximadamente 0,754 kJ/mm. Os demais parâmetros de soldagem utilizados estão presentes na Tabela 3.

TABELA 3. Variáveis e parâmetros de soldagem utilizados nos testes.

Variáveis do Processo	Parâmetros do Processo	Variáveis do Processo	Parâmetros do Processo
Abertura de junta (mm)	3	Frequência de oscilação (Hz)	2,5
Stick-out (mm)	15	Amplitude de oscilação (mm)	3
Diâmetro do bocal (mm)	16		

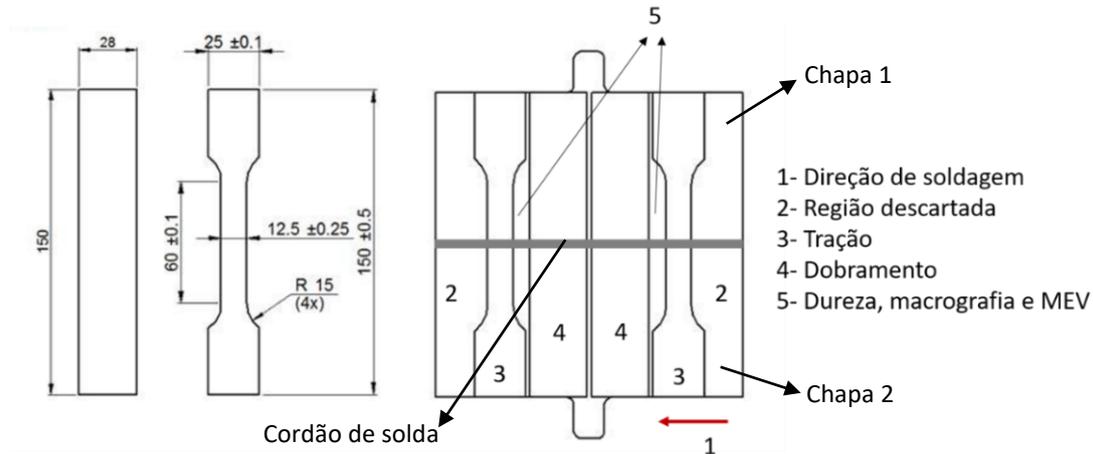
Fonte: Autor (2023).

Para soldar as amostras foi realizado um pré-aquecimento afim de evitar a formação de trincas a frio, retardando o resfriamento da região de solda e assim promovendo a efusão do hidrogênio em um tempo menor e em maior extensão após a soldagem. Outra função do pré-aquecimento em aços martensíticos é reduzir o estado de tensões internas do material. O aço foi soldado com diferentes temperaturas de pré-aquecimento: temperatura ambiente, 50, 120 e 210°C. A temperatura de 50°C foi definida utilizando as equações presentes na norma BS EN 1011-2, através do método “B” de prevenção da formação de trinca por hidrogênio, já a temperatura de 120°C foi selecionada por ser uma temperatura intermediária entre 50 e 210°C. A temperatura de 210°C foi determinada utilizando a equação de carbono equivalente dada pelo IIW (International Institute of Welding) e a tabela fornecida pela ESAB que relaciona a equação de carbono equivalente à diferentes temperaturas de pré-aquecimento (ESAB *et al.* 2005).

1.3 Caracterização

Após a soldagem das chapas, os corpos de provas para realização da caracterização do material, nas diferentes condições soldadas, foram retirados da peça conforme a Figura 3. Foram descartados 25 mm de material de cada lado do cordão de solda.

FIGURA 3. Imagem esquemática do local de onde foram retirados os corpos de prova utilizados na caracterização.



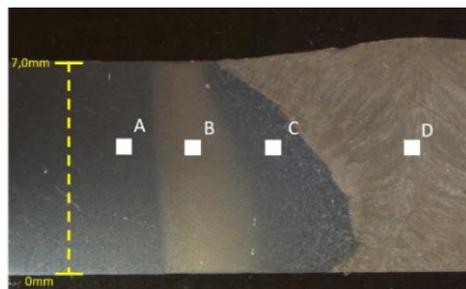
Fonte: Autor (2023).

A fim de qualificar o processo de soldagem das amostras, foi realizada a macrografia da região soldada e sua avaliação conforme a norma ISO 5817: 2014, e o ensaio de dobramento transversal de face e raiz, pelo método guiado, até atingir 180°, em uma máquina de ensaios universal de capacidade de 200 kN, adaptada para o ensaio. Também foi avaliada a diluição da soldagem através das imagens de macrografias.

Para avaliar o comportamento mecânico da junta soldada, o perfil de dureza foi obtido conforme a norma DIN EN ISO 9015-1:2011 na escala Vickers (HV), com a carga de 10 kgf aplicada por 10 segundos, a 1,75 mm de distância da superfície da peça, através do equipamento da marca EMCO – Test, modelo Durascan 20. Os corpos de prova de tração foram fabricados conforme norma DIN EN ISO 4136:2013 pelo processo de eletroerosão a fio, a fim de não utilizar nenhum processo de corte térmico que poderia impactar nas propriedades mecânicas do material. Foram ensaiadas 3 amostras de cada condição utilizando uma Máquina Universal de Ensaios, com capacidade para 1000 kN.

A caracterização microestrutural do material foi realizada por meio de um MEV da marca JEOL, modelo JSM 7100 F. As amostras foram preparadas através do procedimento metalográfico padrão, e as regiões de zona afetada pelo calor subcrítica (A), intercrítica (B), de grãos grosseiros (C) e o metal de solda (D) foram analisadas, conforme mostra o esquema presente na Figura 4.

FIGURA 4. Regiões onde foram realizadas as imagens de MEV.



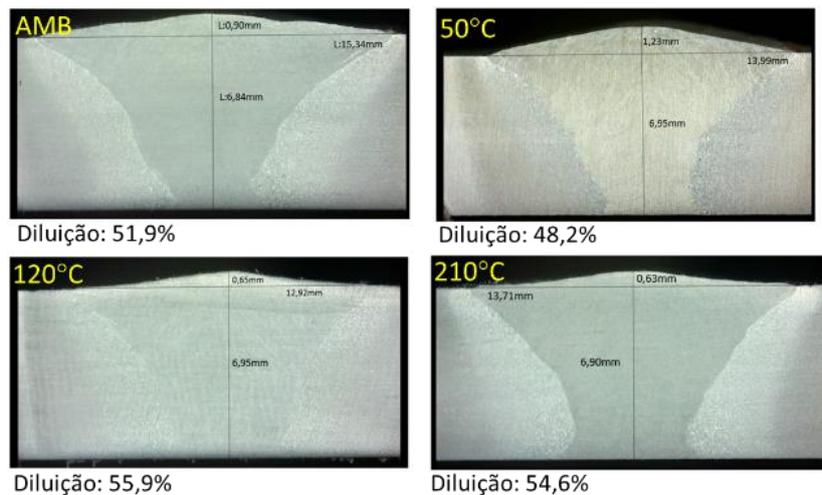
Fonte: Autor (2023).

2. RESULTADOS

2.1 Macro e microscopia

Na Figura 5, são apresentados os resultados de macrografia para as 4 condições das chapas soldadas, onde pode-se observar que a soldagem foi realizada em um único passe com penetração completa e em conformidade com a ISO 5817:2014, ausente de descontinuidades. Abaixo das imagens de macrografia consta o resultado de diluição da soldagem.

FIGURA 5. Macrografias de soldagem.

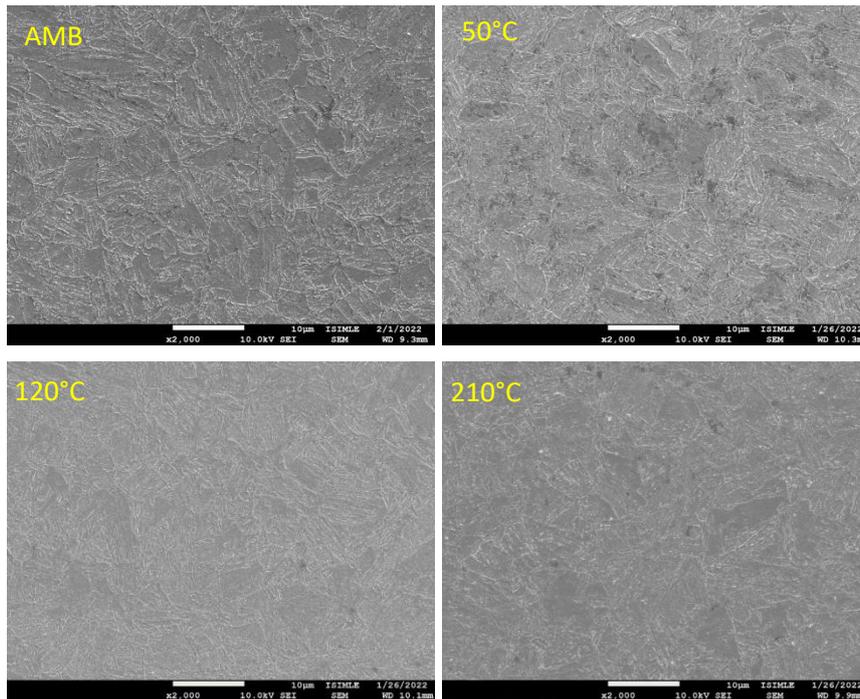


Fonte: Autor (2023).

Os resultados de micrografia são demonstrados para as 4 condições de pré-aquecimento em cada uma das regiões. Na região A, zona afetada pelo calor subcrítica, observa-se uma microestrutura predominantemente martensítica, sendo que na condição soldada à temperatura ambiente, houve um auto-revenimento da martensita proveniente do processo de estampagem, e já nas demais condições, o auto-revenimento também foi afetado pela exposição do material ao calor gerado pelo pré-aquecimento e pelo ciclo térmico da soldagem.

Observa-se na Figura 6, que quanto maior a temperatura de pré-aquecimento, mais carbonetos de ferro são observados nos contornos de grãos da martensita.

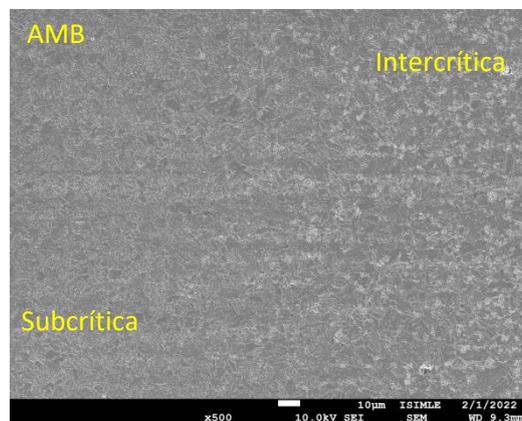
FIGURA 6. MEV da região A (subcrítica) para as 4 condições de pré-aquecimento.



Fonte: Autor (2022).

A região B é a região da zona afetada pelo calor intercrítica, onde o aço durante a soldagem atinge temperaturas que provocam a transformação parcial da microestrutura do aço em austenita (no diagrama de fases ferro-carbono, temperaturas entre A1 e A3). Observa-se essa mudança da microestrutura da região A para a região B através da Figura 7. Na região intercrítica, tanto há presença de bainita e martensita, proveniente do resfriamento da parte da região intercrítica que austenitizou, quanto uma microestrutura com um aspecto ferrítico, proveniente da martensita auto-revenida em alta temperatura (pelo ciclo térmico de soldagem), que por sua vez, é oriunda do metal-base

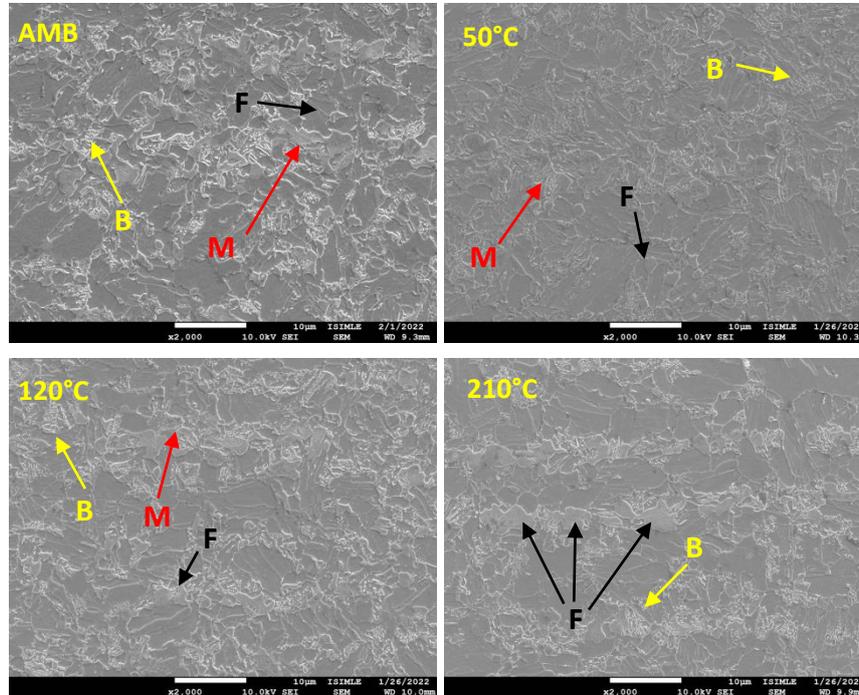
FIGURA 7. MEV da interface entre as regiões A e B, condição soldada sem pré-aquecimento.



Fonte: Autor (2022).

Na região intercrítica, à medida que a temperatura de pré-aquecimento aumenta, observa-se através da Figura 8, a existência de uma maior quantidade de ferrita, com tamanhos de grãos maiores.

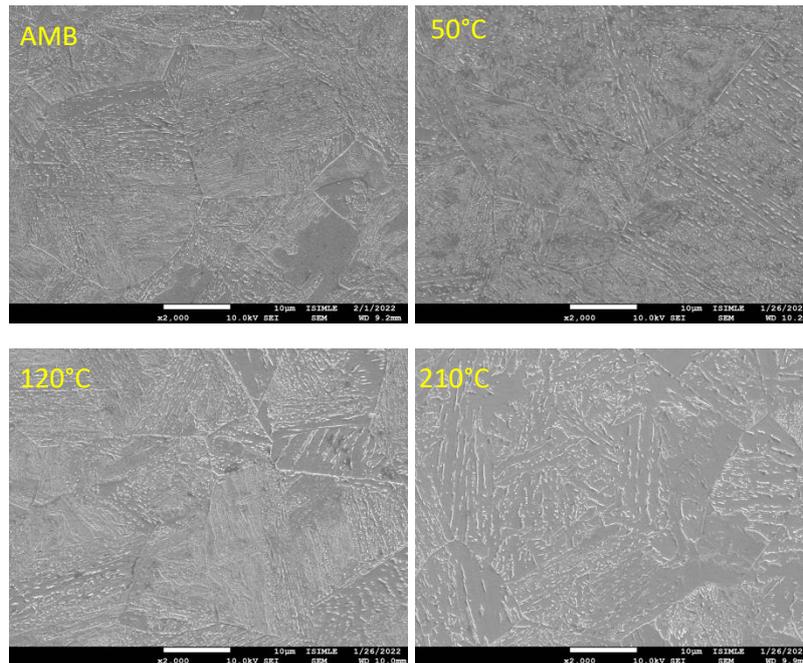
FIGURA 8. MEV da região B (intercrítica) para as 4 condições de pré-aquecimento.



Fonte: Autor (2022).

A região C é a chamada zona afetada pelo calor de grãos grosseiros, e localiza-se imediatamente ao lado da zona fundida. A região de grãos grosseiros foi completamente austenitizada durante a soldagem e então durante o resfriamento houve a formação de bainita + martensita, com um crescimento de grãos associado a esta alta temperatura e o tempo que a mesma ficou submetida devido ao ciclo térmico de soldagem. Pode-se observar a partir da Figura 9 que as mesmas fases são encontradas para todas as condições de pré-aquecimento nessa região, mas nota-se que à medida que a temperatura de pré-aquecimento aumenta, a microestrutura se torna ainda mais grosseira, com grãos maiores, com a bainita mais presente e carbonetos maiores, isso se deve a uma menor taxa de resfriamento por conta da maior temperatura de pré-aquecimento.

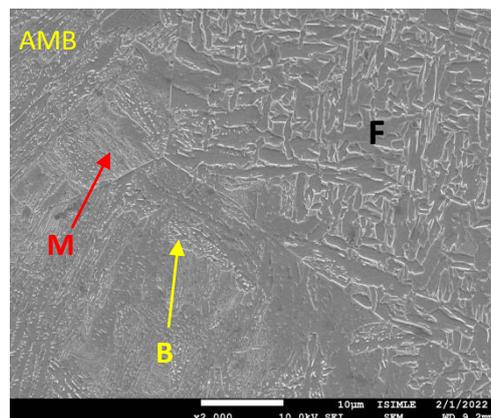
FIGURA 9. MEV da região C (grãos grosseiros) para as 4 condições de pré-aquecimento.



Fonte: Autor (2022).

A região D é a zona fundida, local onde houve a fusão do aço junto com o metal de adição e então a solidificação após a passagem da tocha de soldagem. A microestrutura presente nessa região difere-se bastante da de grãos grosseiros, como pode ser visto na Figura 10, onde está apresentada a interface entre as duas regiões.

FIGURA 10. MEV da interface entre as regiões C e D, condição soldada sem pré-aquecimento.

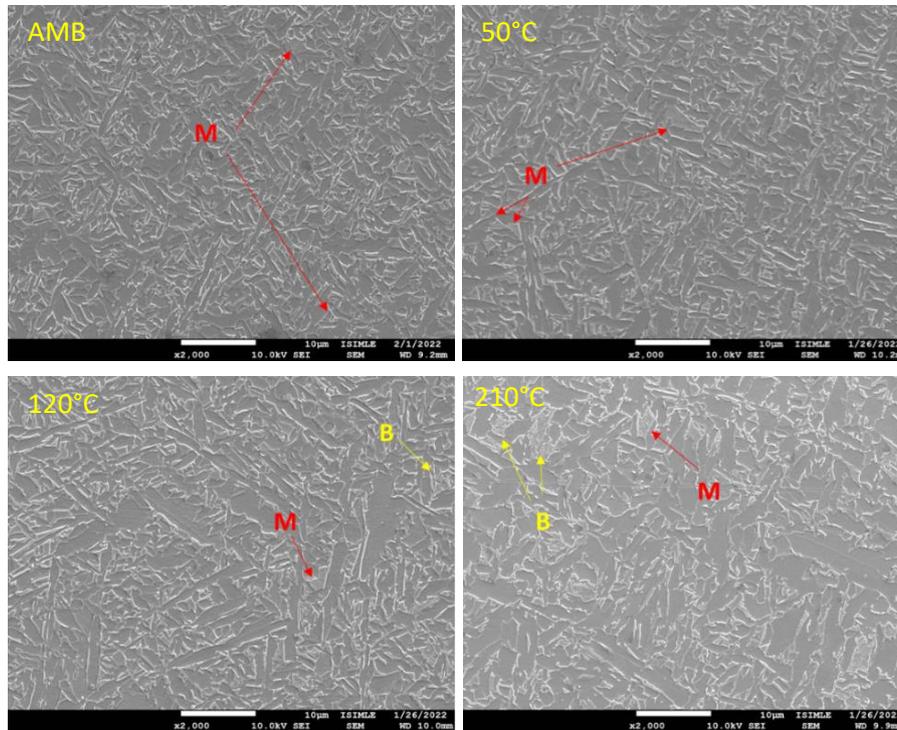


Fonte: Autor (2022).

A microestrutura final da região D, que é o metal de solda, é composta predominantemente por ferrita acicular devido à composição química do metal de solda (proveniente da diluição entre o aço e o metal de adição) e taxas de resfriamento associados à sua solidificação e resfriamento, porém foram percebidas regiões bastante pontuais onde há formação de bainita e/ou martensita. Através da Figura 11, novamente pode-se observar que com o aumento da temperatura de pré-

aquecimento a microestrutura tende a ser mais grosseira; visualmente, isso pode ser percebido com um aumento da área em “cinza” comparado à área em “branco”.

FIGURA 11. MEV da região D (metal de solda) para as 4 condições de pré-aquecimento.



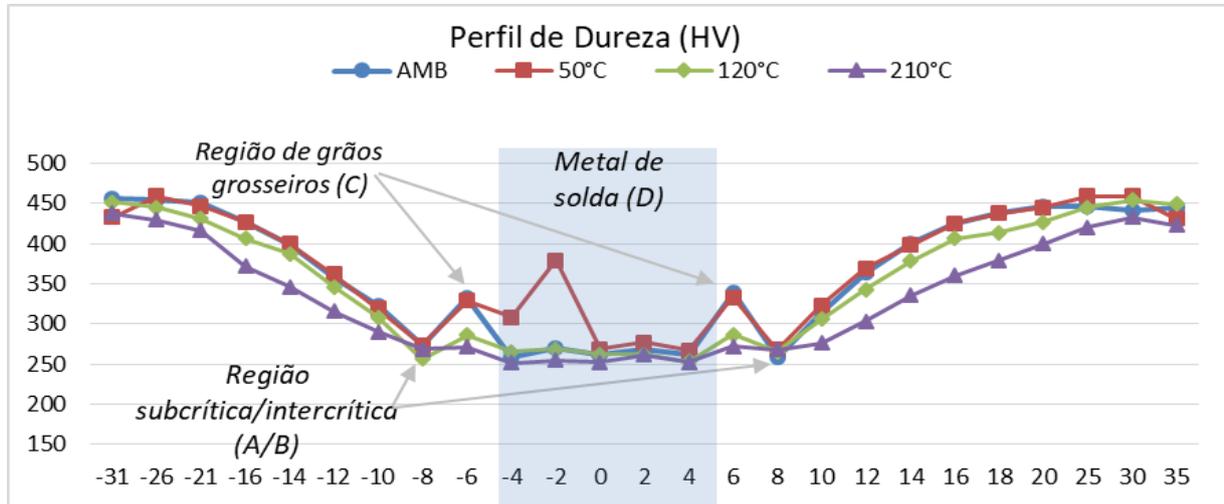
Fonte: Autor (2022).

2.2 Propriedades Mecânicas

O perfil de dureza para cada uma das condições das chapas soldadas foi mapeado e comportamentos bastante similares foram encontrados, conforme é visto na Figura 12. Todos eles partem de durezas acima de 430 HV, nos pontos mais extremos dos gráficos de dureza, onde uma microestrutura martensítica auto-revenida é observada. A dureza do material tende a ir diminuindo à medida que se aproxima do metal de solda devido ao calor gerado pela soldagem, até chegar em durezas de aproximadamente 265 HV, na região de interface entre a região subcrítica e intercrítica, à 10 mm de distância do centro do cordão de solda. Na região de grãos grosseiros há uma diferença no comportamento da dureza para as diferentes condições soldadas. Um aumento bastante significativo na dureza é encontrado nas condições sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento de 50°C, chegando a durezas superiores a 330 HV, característica da microestrutura formada por bainita + martensita no aço 22MnB5 (Naderi *et al.* 2008). Já o comportamento da dureza nesta mesma região para as condições pré-aquecidas a 120 e 210°C é diferente, o aumento da dureza é de menor intensidade, atingindo valores de 279 HV, isso devido a uma microestrutura mais grosseira, com grãos ainda maiores e com maior presença de bainita frente a martensita, quando comparadas às demais condições. Já no metal de solda o comportamento do perfil de dureza é similar para todas as condições porém com durezas médias diferentes. Há uma queda na dureza após a região de grãos grosseiros, mais acentuada nas condições sem pré-aquecimento e com pré-aquecimento de 50°C, atingindo a dureza média nesta região de 264 HV e 300 HV, respectivamente, esse último apresentando valor médio bem elevado possivelmente pelo fato de

algumas endentações terem atingido parte de uma região com martensita e/ou bainita existentes no metal de solda. Nas condições pré-aquecidas a 120 e 210°C a dureza média no metal de solda foi de 262 HV e 254 HV, respectivamente.

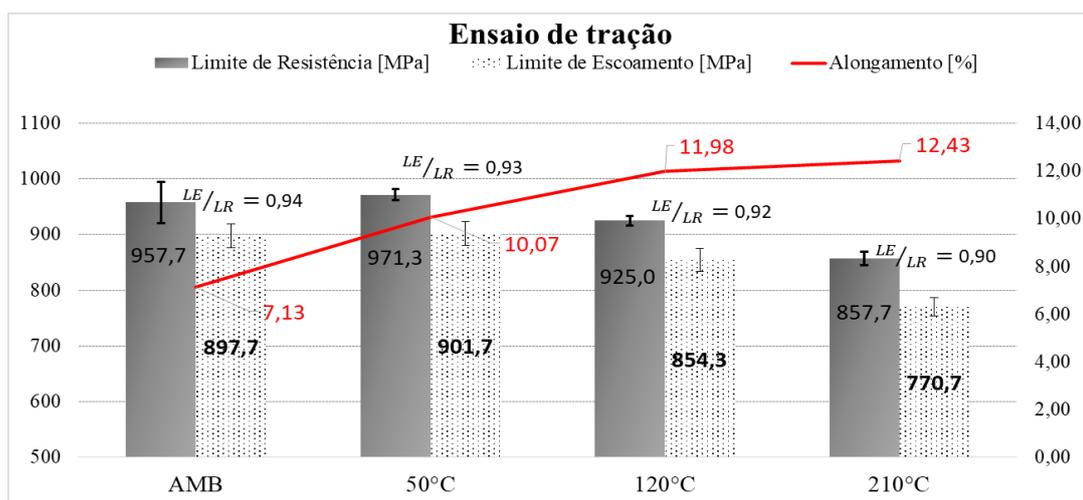
FIGURA 12. Perfil de dureza da região soldada para as 4 condições do material. Dureza em HV e distância para o centro da solda em milímetros.



Fonte: Autor (2023).

Os resultados para o ensaio de tração são apresentados na Figura 13, onde é possível verificar as propriedades de limite de resistência (LR), limite de escoamento (LE), alongamento e a razão elástica.

FIGURA 93. Resultado do ensaio de tração para as 4 condições do material soldado.



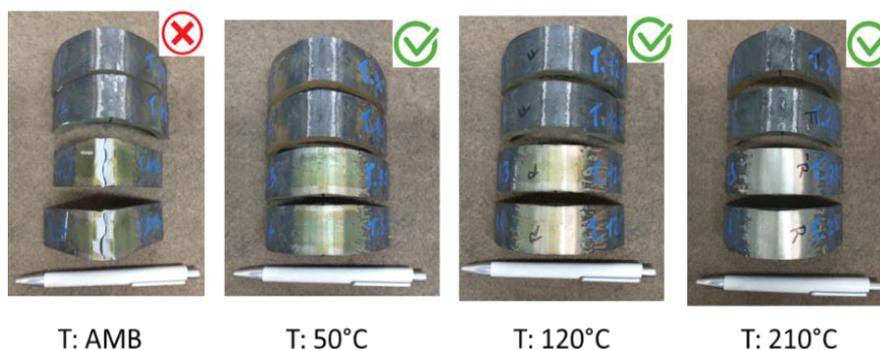
Fonte: Autor (2023).

Durante o ensaio de tração todos os corpos de prova de todas as condições romperam na região do metal de solda, onde foi observada uma microestrutura predominantemente de ferrita acicular. A condição sem pré-aquecimento e pré-aquecida a 50°C tiveram resultados de limite de resistência e escoamento bastante similares, podendo-se concluir que o pré-aquecimento nesta temperatura

não teve impacto significativo na resistência a tração do material, porém quando avaliado o resultado do alongamento para essas duas condições, verifica-se um alongamento 40% maior na condição pré-aquecida. Para as condições pré-aquecidas a 120 e 210°C houve uma queda substancial na resistência a tração, mais evidente na condição pré-aquecida a 210°C, a qual reduziu o limite de escoamento em 15% quando comparado ao material pré-aquecido a 50°C (melhor resultado de resistência), em função da microestrutura mais grosseira encontrada no metal de solda. Já o alongamento tende a ser maior com o aumento da temperatura de pré-aquecimento, atingindo 12,4% na condição pré-aquecida a 210°C, 74% superior à condição sem pré-aquecimento. De maneira geral, pode-se dizer que com o aumento da temperatura de pré-aquecimento uma microestrutura mais dúctil é obtida, com maior alongamento e menor resistência, devido a uma microestrutura menos refinada no metal de solda e possivelmente uma menor formação de martensita nessa região. Quando comparado o limite de resistência do material após a soldagem com o material base, uma redução de 33% nessa propriedade é observada, já para o limite de escoamento essa redução é de 16%, o que leva a questionar a união desse material pelo processo de soldagem MAG.

Para o ensaio de dobramento, todas as condições apresentaram resultados satisfatórios nos ensaios de dobramento sem a presença de descontinuidade de solda como falta de fusão, inclusão, porosidade, falta de penetração na raiz e nenhuma trinca com tamanho superior a 3 mm na região convexa da amostra, com exceção da condição sem pré-aquecimento, nesse caso o material rompeu nos dois corpos de prova de dobramento de raiz, como pode ser visto na Figura 14. Para essa mesma condição, o resultado do ensaio de tração apresentou o menor alongamento dentre as demais condições. Sem pré-aquecimento, o material experimentou a maior taxa de resfriamento dentre todas as condições e foi soldado sem nenhum alívio nas tensões imediatamente antes da soldagem.

FIGURA 14. Resultado do ensaio de dobramento transversal para as 4 condições do material soldado.



Fonte: Autor (2023).

3. CONCLUSÃO

Foi possível realizar a união do material 22MnB5 + NbMo de 7 mm de espessura com microestrutura martensítica em um único passe, através do processo de soldagem MAG pulsado de forma robotizada, resultando em um cordão de solda íntegro, com penetração completa e ausente de descontinuidades de soldagem, porém com impactos significativos na microestrutura do aço.

Em todas as condições houve perdas expressivas na resistência do material após a soldagem, todavia o material soldado com pré-aquecimento de 50°C apresentou a melhor resistência à tração e um bom alongamento (superior ao material soldado sem pré-aquecimento). Este resultado aponta para a importância da realização do pré-aquecimento em baixas temperaturas na soldagem do material 22MnB5 com microestrutura martensítica, quando a intenção seja manter uma resistência à tração mais elevada, e uma tenacidade razoável. Pré-aquecimento em temperaturas mais altas possuem uma tendência de diminuir consideravelmente a resistência do aço 22MnB5 e aumentar o alongamento. A não realização do pré-aquecimento pode implicar em baixa tenacidade após a soldagem do aço 22MnB5 estampado à quente.

Dentre as condições testadas, o emprego da temperatura de pré-aquecimento de 50°C, calculada a partir das equações apresentadas na norma BS EN 1011:2001, foi a que levou ao melhor resultado de resistência com tenacidade.

REFERÊNCIAS

Araújo, S. Avaliação da influência das condições de superenvelhecimento na microestrutura e propriedades mecânicas de um aço bifásico produzido por recozimento contínuo [doctor thesis]. Belo Horizonte: Universidade Federal De Minas Gerais; 2013.

ArcelorMittal. Outstanding abrasion resistance: Boron steel grades offer excellent resistance against abrasive wear. Durabor Boron Steels. [Atualizada em 2 ago. 2023; Acesso em 10 set. 2022]. Disponível em: https://industry.arcelormittal.com/products-solutions/Products_in_the_spotlight/boronsteels.

Cavusoglu, Onur et al. Microstructural features and mechanical properties of 22MnB5 hot stamping steel in different heat treatment conditions. Journal of Materials Research and Technology. 9(5): p. 10901-10908; 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.043>.

Chang, Y., Meng, Z. H., Ying, L., Li, X. D., Ma, N., & Hu, P. Influence of hot press forming techniques on properties of vehicle high strength steels. Journal of Iron and Steel Research International. 18(5): p. 59-63; 2011. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(11\)60066-6](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(11)60066-6)

Chang, Z. Y., Li, Y. J., & Wu, D. Enhanced ductility and toughness in 2000 MPa grade press hardening steels by auto-tempering. Materials Science and Engineering; A 784; 2020. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139342>

Chen, J., Li, X., & Han, X. Hot Stamping. In: Elsevier. Comprehensive Materials Processing. Vol. 5. Shanghai: Elsevier. p. 351–370; 2014. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00526-4>.

ESAB; Fortes, C.; Vaz, C. Soldagem MIG / MAG. ESAB Welding & Cutting Products; 2005.

Jo, M. C., Yoo, J., Kim, S., Kim, S., Oh, J., Bian, J., Sohn, S. S., & Lee, S. Effects of Nb and Mo alloying on resistance to hydrogen embrittlement in 1.9 GPa-grade hot-stamping steels. *Materials Science and Engineering. A* 789: 139656; 2020. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139656>.

Lancaster, J. *Metallurgy of Welding*, 6th ed. Cambridge: Abington Publishing. p. 256-269; 1999.

Mohrbacher, H. High-Performance Steels for Sustainable Manufacturing of Vehicles. In: Elsevier. *Green and Sustainable Manufacturing of Advanced Materials*. Schilde: Elsevier. p. 135–163; 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411497-5.00006-0>.

Naderi, M., Saeed-Akbari, A., & Bleck, W. The effects of non-isothermal deformation on martensitic transformation in 22MnB5 steel. *Materials Science and Engineering. A*, 487(1–2): p. 445–455; 2008. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.10.057>.

Naderi, Malek. *Hot Stamping of Ultra High Strength Steels* [doctor thesis]. Teheran: Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen; 2007.

Shibata, A; Madi, Y; Okada, K; Tsuji, N; Besson, J. Mechanical and microstructural analysis on hydrogen-related fracture in a martensitic steel. *Internacional Journal of hydrogen energy*. 44: p. 29034-29046; 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.097>.

Turetta, A. *Investigation Of Thermal, Mechanical And Microstructural Properties Of Quenchenable High Strength Steels In Hot Stamping Operations* [doctor thesis]. Padova: Universita' Degli Studi di Padova; 2008.

Venturato, G., Novella, M., Bruschi, S., Ghiotti, A., & Shivpuri, R. Effects of Phase Transformation in Hot Stamping of 22MnB5 High Strength Steel. *Procedia Engineering*. 183: p. 316–321; 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.045>.

Welding, Brazing and Soldering. Volume 6. ASM Handbook; 1993.