



Influência do tipo de resfriamento, da espessura recuperada e da quantidade de cordões de solda sobre a microestrutura e microdureza de juntas soldadas

Caio Matheus Araújo de Vasconcelos¹, Rubelmar Maia de Azevedo Cruz Neto², Antonio do Nascimento Silva Alves³, Sérgio Duarte Brandi⁴, Jaime Casanova⁵

Resumo

Baseado na hipótese que houve um dano que reduziu a espessura de uma chapa de aço do casco de uma embarcação, que a recuperação da espessura será feita por soldagem no lado interno do casco e a estrutura está sobre a água. Nesse caso, esse tipo de manutenção por soldagem apresenta grande desafio técnico por retirar abruptamente calor e conseqüentemente alterar a soldabilidade metalúrgica dos aços empregados. Assim, o objetivo deste trabalho é analisar a influência dos fatores: tipo de resfriamento (ao ar ou com água), espessura recuperada (25 ou 50 % da espessura da chapa) e a quantidade de cordões de solda (um ou dois cordões de solda), sobre a microestrutura e a microdureza do aço SAE 1020 soldado com o eletrodo E7018. Para isso, foi desenvolvido um sistema de circulação de água a temperatura ambiente que pulveriza água na face oposta a soldagem para simular a soldagem de manutenção na hipótese sugerida. Entre os fatores estudados, o tipo de resfriamento é o fator que possui maior influência no tamanho da ZAC, na microestrutura e na microdureza das juntas soldadas. A ZAC tem uma redução de área de até 205% e a microdureza do metal de solda apresenta aumento de 70% nas amostras resfriadas com água. O tipo de resfriamento e a espessura recuperada apresentam interação sobre a microdureza do metal de solda e a quantidade de cordões de solda e espessura recuperada apresentam interação sobre a microdureza da ZAC.

Palavras-Chave: Resfriamento acelerado, soldagem de manutenção, eletrodo revestido, microestrutura, microdureza.

Influence of cooling type recovered thickness and amount of weld bead on a microstructure and microhardness of welded joints. Based on the hypothesis that a damage took place causing reduction of the thickness of a steel plate of a ship hull along with its thickness will be recovered by welding on the inner side of the hull and that the ship hull is underwater. Such type of maintenance, by means of welding, presents a tremendous technical challenge once it abruptly removes heat, hence changes the metallurgical weldability of the steels used. Thus, this work aims to analyze the influence of the following factors: type of cooling (air or water), thickness recovered (25 or 50% of the thickness of the plate), and the number of weld beads (one or two weld beads), in the microstructure and

¹ Mestrando PPGCEM/UFAM, Manaus-AM. caio.mav@hotmail.com

² Professor, Depto de Engenharia Mecânica, UEA, Manaus-AM. rcruzneto@uea.edu.br

³ Pesquisador, Depto de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, USP-SP. antonio.engmec@gmail.com

⁴ Professor, Depto de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, USP-SP. sebrandi@usp.br

⁵ Professor, Depto de Engenharia de Materiais, UFAM, Manaus-AM. jaimecasanova@ufam.edu.br



microhardness of SAE 1020 steel welded with the E7018 electrode. For this purpose, a water circulation system was developed. The system, at room temperature, sprays water on the opposite face of the welding to simulate maintenance as in the suggested hypothesis. Among other factors studied, the type of cooling is the one that has the greatest influence in the size of the HAZ, the microstructure, and the microhardness of the welded joints. The HAZ suffers a reduction of its area up to 205%. The microhardness of the weld metal shows an increase of 70% as cooled with water. Therefore, the type of cooling and the thickness recovered have an interaction in microhardness of the weld metal. Finally, the number of weld beads and thickness recovery have a noticeable interaction in microhardness of the HAZ.

Keywords: Accelerated cooling, maintenance welding, SMAW, microstructure, microhardness.

1. Introdução

Para realização da soldagem de manutenção em cascos de embarcações, podem-se destacar três alternativas: a primeira em docas secas, apresentando maior segurança e simplicidade, todavia existem a necessidade de locomoção da embarcação e de estruturas adequadas. A segunda é a soldagem subaquática, podendo ser realizada de imediato, mas apresenta riscos aos profissionais envolvido e possui parâmetros de soldagem difíceis (GUTIÉRREZ et al., 2016; BARNABAS et al., 2020; CHANGQING et al., 2019; HONG et al., 2014). E a terceira opção, menos usual, é realizada do lado interno da embarcação, recuperando uma possível espessura perdida do lado externo, que está em contato com a água.

A terceira opção não oferece os altos custos da primeira opção e nem os riscos aos profissionais envolvidos que a segunda opção oferece. Apresenta uma redução no tempo, por não precisar se locomover, nos custos de manutenção da estrutura e também pode ser feita com processos de soldagem mais simples, como o eletrodo revestido (WU et al., 2019; SOEIRO JUNIOR et al., 2013; TANIGUCHI et al., 2004; BAI, 2001).

Contudo, o uso da terceira opção pode modificar a transferência de calor

na soldagem. Isso por causa que a soldagem será realizada em ambiente seco, mas no lado oposto terá um fluxo de água retirando calor. Assim, a transferência de calor pode variar de 2D ("chapas finas", extração acontece em duas dimensões) para 2,5D (fluxo de calor atinge parcialmente a parte inferior, iniciando nas três dimensões e com transição para 2D conforme se aumenta a distância) ou para 3D ("chapas grossas", extração de calor acontece nas três dimensões (SOEIRO JUNIOR et al., 2013; NETO, 2018; JUERS et al., 1998; AWS, 2004; PERRET et al., 2010; STENBACKA et al., 2012)).

Com a água retirando o calor abruptamente do lado oposto ao da soldagem, a soldabilidade metalúrgica poderá ser alterada. Isso pode ocorrer devido a alteração da taxa de resfriamento dos ciclos térmicos de soldagem, tendo como possíveis consequências mudanças nas características microestruturais da junta soldada e conseqüentemente, podendo afetar suas propriedades mecânicas (SOUZA, 2018; AWS, 2001; PETROBRAS, 2008; FARIA et al, 2012, OMOLE et al, 2020).

Partindo da hipótese que houve um dano que reduziu a espessura da chapa de aço que compõe o casco de uma embarcação, o objetivo desse trabalho é desenvolver a metodologia de

manutenção de casco de embarcações por soldagem, utilizando um dispositivo que simula fisicamente esse tipo de soldagem, sobre as propriedades mecânicas das juntas soldadas, visando analisar a influência dos fatores: tipo de resfriamento (ao ar ou com água), da espessura a se recuperar e do número de cordões de solda sobre a microestrutura e a microdureza do aço SAE 1020 soldado com o eletrodo revestido E7018.

2. Materiais e Métodos

2.1 Sistema de Resfriamento Acelerado

Para simular o processo de manutenção em cascos de embarcações, foi utilizado o sistema de resfriamento com água em temperatura ambiente (25 °C) (figura 1). A chapa a ser soldada tem a superfície inferior em contato com os jatos de água, simulando o lado externo de uma embarcação. A superfície superior da chapa não tem contato direto com a água, simulando o lado interno de uma embarcação, local onde foi realizada a soldagem para recuperar a espessura. As setas da cor vermelha representam o fluxo de água (figura 1). A temperatura de saída d'água é a mesma da entrada, tendo em vista que o contato é rápido e o tempo de soldagem é curto (menos de 1 minuto), não possibilitando aumentar a temperatura da mesma.

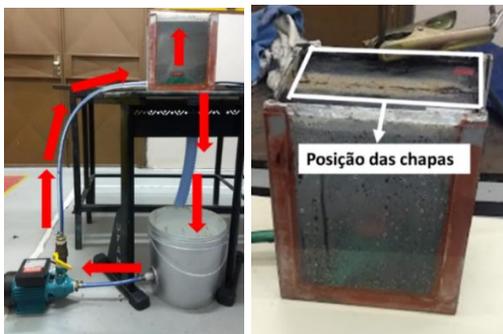


Figura 1 – Dispositivo de resfriamento acelerado com fluxo d'água no sistema (setas em vermelho) e o posicionamento da chapa de aço soldada.

2.2 Procedimento de Soldagem

Foram soldadas quatro chapas de aço (composição química na tabela 1) de 150 mm de largura, 210 mm de comprimento e 6,35 mm de espessura. As chapas tiveram um entalhe usinado de 6,0 mm de largura, no meio da chapa e em todo o comprimento da chapa, para simular uma redução na espessura recuperada por soldagem (figura 2). Variou-se apenas a profundidade do entalhe usinado, onde as chapas 1 e 2 tiveram 50 % da espessura da chapa removida (3,2 mm) e as chapas 3 e 4 tiveram 25 % da espessura da chapa removida (1,6 mm). A modelagem foi feita com o software Siemens Solid Edge™ 2021 versão de estudante.

A soldagem foi realizada com o processo eletrodo revestido, com o consumível Esab E7018 (composição química na tabela 2 conforme o certificado de qualidade fornecido), com diâmetro de 2,5 mm, corrente de soldagem pré-ajustada em 80 A e com auxílio de um soldador (soldagem manual). A temperatura interpasso utilizada foi a temperatura ambiente (25 °C), utilizando um pirômetro de contato para verificação.

Cada chapa utilizada apresentava metade do entalhe preenchido por soldagem com um cordão de solda e a outra metade com dois cordões de solda. Após a soldagem, as chapas foram cortadas, sendo retiradas um total de oito corpos de prova com os parâmetros descritos na tabela 3. Nota-se na figura 3 o posicionamento dos cortes para retiradas das amostras. Os cortes, representados pelas linhas vermelhas, foram realizados por meio de uma serra fita horizontal com uso de lubrificante e os cortes, representados pelas linhas amarelas, foram realizados em um sistema cut-off com uso de lubrificantes.

Tabela 1 – Composição química em porcentagem mássica das chapas SAE 1020.

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Al%	Cu%	Ni%	Cr%
0,19	0,014	0,71	0,02	0,01	0,04	0,01	0,01	0,03

Fonte: certificado de qualidade da chapa

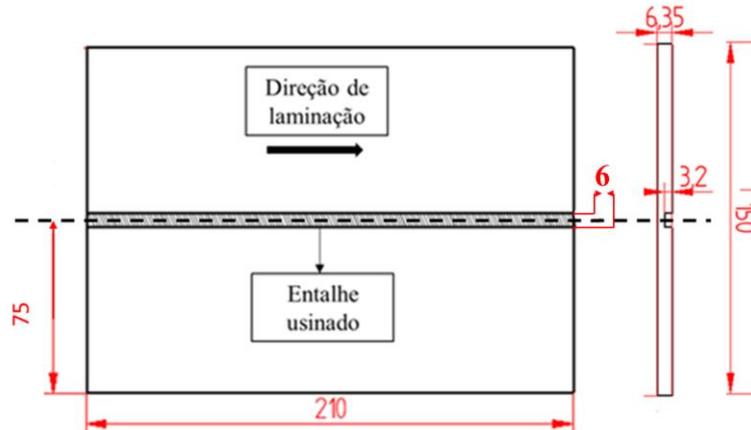


Figura 2 – Desenho das chapas 1 e 2 (50 % de espessura removida), em milímetros, com o entalhe usinado

A equação 1 apresenta a fórmula para o cálculo da energia de soldagem.

$$E = \eta * \frac{V * I}{VS}$$

Equação 1 - fórmula da energia de soldagem (NETO, 2018; AWS, 2001).

onde 'E' representa energia de soldagem (em J/mm), V tensão (em Volts), I corrente elétrica (em Ampéres) e VS a velocidade de soldagem (em mm/s). Não foi utilizado o valor de eficiência do processo de soldagem.

Tabela 2 – Composição química em porcentagem mássica do eletrodo E7018.

C%	Mn%	Si%	Ni%	Cr%	Mo%
0,08	1,60	0,75	0,30	0,20	0,30

Fonte: certificado de qualidade dos eletrodos.

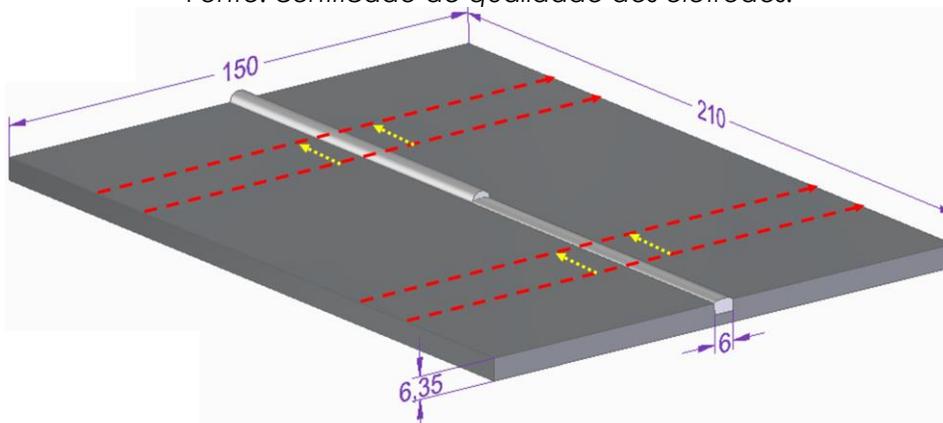


Figura 3 – Cortes realizados nas chapas para obtenção dos corpos de prova (escala em milímetros)

Tabela 3 – Relação dos corpos de prova com os parâmetros de soldagem.

Amostra	N.C.	T.R.	E.R. (%)	Tensão (V)	Corrente (A)	VS (mm/s)	Energia* (J/mm)
CP1	1	Água	50	24,6 ± 5,1	83,9 ± 8,3	2,9	711,7
CP2	1	AR	50	26,0 ± 5,4	82,0 ± 7,6	3,1	687,7
CP3	1	Água	25	25,8 ± 5,7	88,8 ± 7,5	3,4	673,8
CP4	1	AR	25	23,9 ± 5,2	84,2 ± 8,8	2,9	693,9
CP5	2	Água	50	23,7 ± 5,3	93,2 ± 8,1	2,2	1004,0
CP6	2	AR	50	23,4 ± 5,1	89,7 ± 8,9	2,6	807,3
CP7	2	Água	25	23,0 ± 5,1	89,5 ± 8,8	3,3	623,8
CP8	2	AR	25	23,6 ± 5,0	88,8 ± 8,8	3,1	676,0

Nota: * não foi utilizado valor de eficiência do processo de soldagem; N.C.: número de cordões de solda; T.R.: tipo de resfriamento; E.R.: espessura recuperada; VS: velocidade de soldagem.

2.3 Ensaios realizados

As amostras foram embutidas, lixadas e polidas com alumina de 1,0 e 0,5 µm, sendo realizado ataque químico com o reagente Nital por 5 s com concentração de 5 % para obtenção das macrografias e micrografias. Para o cálculo da área das ZACs, foi utilizado o software ImageJ™. Foi analisada a microestrutura em toda a amostra de todos de cada experimento, sendo escolhido para as figuras as imagens mais relevantes.

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado com o equipamento Fischerscope® HM2000. Foram realizadas nove impressões de microdureza (figura 4) com força de 0,2 kgf: três no centro do metal de solda (ponto C), três na ZAC (ponto B) à 0,1 mm da zona de fusão e três a 1,0 mm da face oposta à soldagem (ponto A). A distância entre as impressões foi de 0,3 mm, baseado na norma NBR ISO 6507-1/2019.

2.1 Análises Estatísticas dos Experimentos

Um delineamento experimental completo com três fatores em dois níveis foi utilizado para identificar se os fatores: tipo de resfriamento (ao ar ou com água), espessura recuperada (25 ou 50 %) e a quantidade de cordões de solda (um ou dois cordões), apresentam influência sobre a microestrutura e a microdureza das juntas soldadas. As comparações das

médias foram realizadas com intervalo de confiança de 95 % e foi utilizado o método de Tukey, ao qual para informar se não possui influência significativa, é necessário visualizar se tal comparação encostou no eixo vertical do ponto 0. Em ambas as análises foi utilizado o software comercial Minitab® 19.

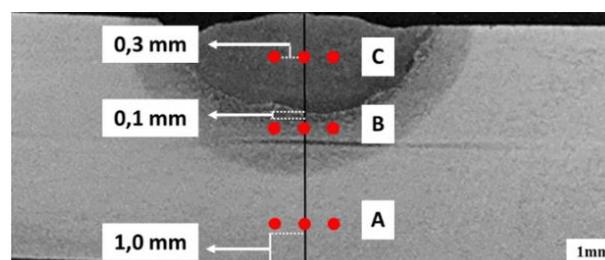


Figura 4 – Localização das regiões onde foram realizadas as medidas de dureza.

3. Resultados e Discussão

3.1. Análises Macrográficas

Nota-se a influência do resfriamento acelerado, causado pela água na face oposta a soldagem, sobre a extensão da ZAC (figura 5). A área da ZAC do CP2 aumentou em 216 % em relação da área da ZAC do CP1 (ambos com 1 cordão de solda e 50% da espessura recuperada), tabela 4. Esse comportamento foi similar em todas as amostras, independente da espessura recuperada e da quantidade de cordões de solda, isto é, alterando apenas o tipo de resfriamento. Assim, a área da ZAC do CP4 é 205 % maior que a ZAC do CP3 (ambos com 1 cordão de

solda e 25% da espessura recuperada), a área da ZAC do CP6 é 120% maior que a ZAC do CP5 (ambos com 2 cordões de solda e 50% da espessura recuperada) e a área da ZAC do CP8 é 135 % maior que a ZAC do CP7 (ambos com 2 cordões de solda e 25% da espessura recuperada).

A alteração do tipo de transferência de calor (2D, 2,5D e 3D) e a taxa de resfriamento, CP1, CP3, CP5 e CP7 que

tiveram a retirada abrupta de calor pelo sistema de resfriamento acelerado, fez com que fosse modificada a área da ZAC. Esse comportamento é mais explícito quando a amostra é submetida ao resfriamento com água no lado oposto a soldagem (SOUZA et al, 2021; OGATA, 2009; MOOJEN et al, 2015; LI et al, 2021).

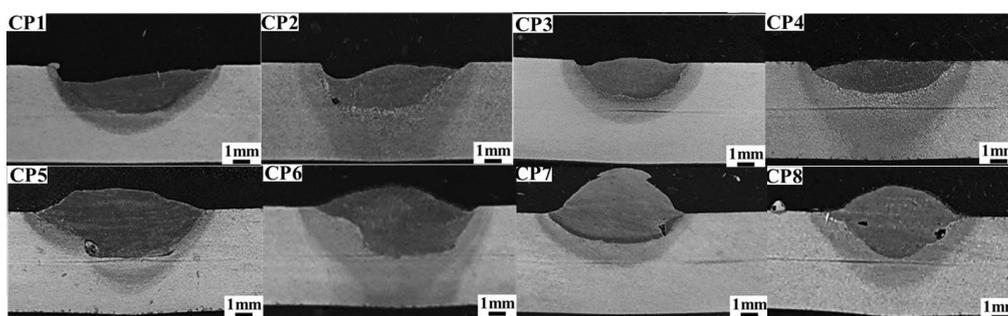


Figura 5 – Macrografias das amostras soldadas.

Tabela 4 – Área das zonas afetadas pelo calor de cada amostra.

Amostra	Quantidade de Cordões de Solda	Tipo de Resfriamento	Espessura Recuperada	Área da ZAC* (mm ²)
CP1	1	Água	50%	7,7 ± 1,5
CP2	1	AR	50%	24,3 ± 1,6
CP3	1	Água	25%	9,1 ± 1,2
CP4	1	AR	25%	27,8 ± 1,3
CP5	2	Água	50%	9,6 ± 1,4
CP6	2	AR	50%	21,1 ± 1,2
CP7	2	Água	25%	8,6 ± 1,7
CP8	2	AR	25%	20,2 ± 1,3

Nota: * foi realizado três medidas da área da ZAC (com Image J[®]) na mesma imagem de cada amostra.

3.2. Microestruturas

O resfriamento acelerado modificou a fração volumétrica de perlita na ZAC de grão refinado, figura 6. Independente da espessura recuperada e da quantidade de cordões de solda, a fração volumétrica de colônias de perlita aumentou quando a amostra foi submetida ao resfriamento acelerado. Isso ocorreu devido a perlita começar a se formar antes de finalizar a formação da ferrita, fazendo com que a formação da ferrita fosse interrompida e privilegiando a

formação da perlita. Devido a nucleação, isto é, o aparecimento de um núcleo da nova fase no interior de uma fase pré-existente, desempenhando uma importância na ocorrência das transformações de fase e na velocidade com os quais estas transformações se passam, ao qual a formação dessas pequenas partículas, ou núcleos, são capazes de crescer (RAVI et al, 2020; SILVA et al., 2010, PATHAK et al, 2020). A composição microestrutural foi obtida basicamente por ferrita, com diferentes morfologias, e colônias de perlita.

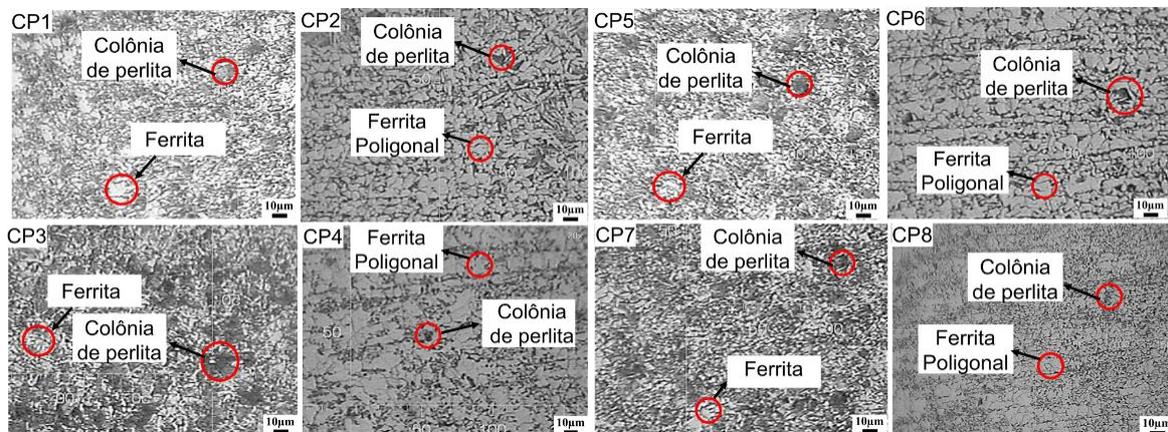


Figura 6 – Microestrutura da ZAC de grão refinado.

A microestrutura da ZAC de grão grosso, também é composta de colônias de perlita e ferrita, figura 7. Observou-se que as colônias de perlita apresentaram, qualitativamente, um maior tamanho nas amostras resfriadas ao ar (CP2, CP4, CP6 e CP8) quando comparadas com as amostras resfriadas com água (CP1, CP3, CP5 e CP7). Essa condição está relacionada ao tempo que a região ficou em temperaturas onde ocorreu o crescimento de grão da austenita anterior. Sendo intensificado pela taxa de resfriamento mais abrupta que ocorreu nas amostras resfriadas com água, onde as colônias de perlita são diferenciadas conforme a temperatura de transformação e o tempo nesta temperatura, pois resfriamentos próximos à temperatura eutetóide (de austenitização) levam à formação de colônias de perlita de maior tamanho de grão e com lamelas com espessura maior, isto é, perlita grosseira (SILVA et al, 2010; CALLISTER et al, 2016).

A microestrutura no cordão de solda é composta por ferrita acicular e ferrita de contorno de grão, figura 8. As amostras resfriadas com água apresentaram uma menor quantidade de ferrita de contorno de grão e um aumento na quantidade de

ferrita acicular quando comparada as amostras resfriadas ao ar. Esse comportamento é independente da espessura recuperada e da quantidade de cordões de solda realizado. A ferrita de contorno de grão é o primeiro constituinte a se formar na decomposição da austenita e sua formação ocorre em taxas de resfriamento muito lenta. Porém, não são encontradas em metais de solda de aços de alta resistência devido ao elevado teor de elementos de liga que retarda tanto a nucleação quanto as reações de crescimento difusional (MOOJEN et al, 2015; OGATA et al, 2009; SOEIRO JUNIOR et al, 2013; SOUZA, 2003).

3.3. Microdureza

As amostras CP2 (50% E.R, 1 N.C, T.R ar) e CP6 (50% E.R, 1 N.C, T.R ar) apresentaram os maiores valores de microdureza no ponto A (figura 9). Essas amostras não apresentaram diferença significativa no intervalo de confiança de 95 % entre si, figura 9a. Porém, o CP6 também não apresentou diferença significativa no intervalo de confiança de 95 % com as amostras CP4 e CP5.

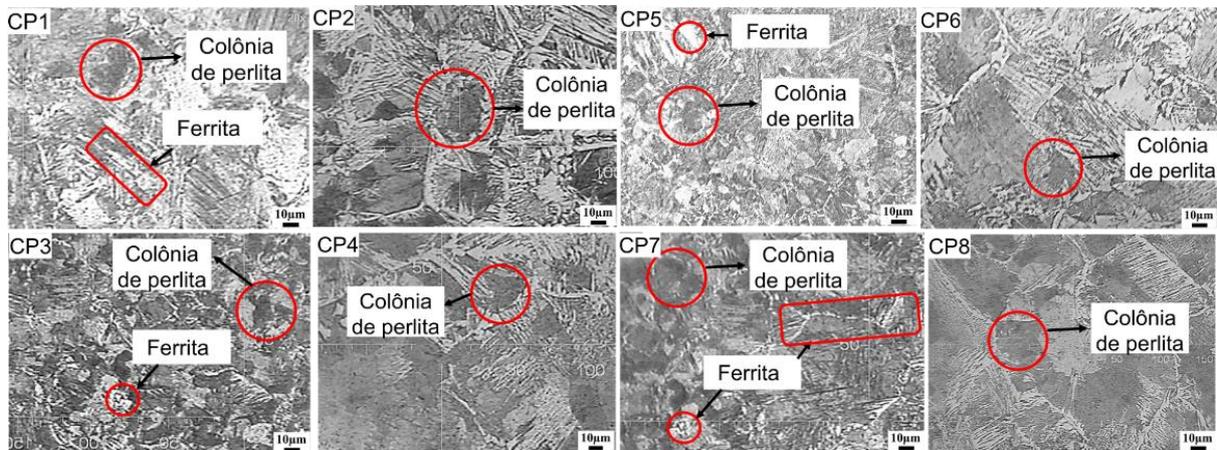


Figura 7 – Microestrutura da ZAC de grão grosseiro.

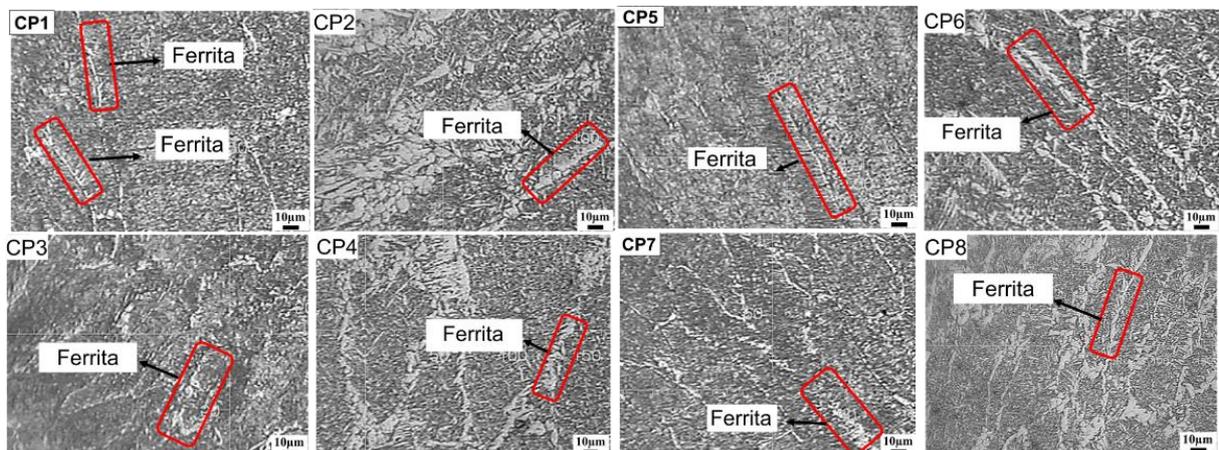


Figura 8 – Microestrutura do cordão de solda das amostras soldadas.

O CP2 ofereceu essa modificação da microdureza devido apresentar uma ZAC de maior tamanho quando comparado ao CP1 (50% E.R, 1 N.C, T.R água), tabela 4. Podendo ainda ser influenciado pela relação tempo e temperatura, pois como foi resfriado ao ar, o mesmo alcançou uma temperatura de pico maior, permanecendo mais tempo nessa condição quando comparado com o resfriamento com água, tendo em vista que o resfriado ao ar não possuía a água para a retirada de calor. Contudo, o CP6 não apresentou diferença significativa com o CP5 (50% E.R, 2 N.C, T.R água), estando relacionado a alteração da espessura soldada, pois tanto no CP6 como no CP5, a espessura original foi modificada pelo primeiro cordão de solda.

No Ponto 'A', todas as amostras apresentaram diferença significativa no intervalo de confiança de 95 % com o metal de base. Independentemente do tipo de resfriamento, da espessura recuperada e da quantidade de cordões de solda, a microdureza no ponto A foi maior que o encontrado no metal de base.

Para o ponto B (ZAC), o CP1 (50% E.R, 1 N.C, T.R água) não apresentou diferença significativa no intervalo de confiança de 95 % com o CP3 (25% E.R, 1 N.C, T.R água) e o CP7 (25% E.R, 2 N.C, T.R água). Assim, os maiores valores de microdureza na ZAC estavam nas amostras resfriadas com água, figura 9b. Todavia, o CP3 e o CP7 apresentaram diferença significativa no intervalo de confiança de 95 % entre si, isso demonstra

uma influência da quantidade de cordões de solda na microdureza da ZAC.

O CP5 (50% E.R, 2 N.C, T.R água) não apresentou diferença significativa no intervalo de confiança de 95 % na microdureza da ZAC quando comparado com o CP6 (50% E.R, 2 N.C, T.R ar). Esse resultado pode estar relacionado com a energia de soldagem empregada no CP5 (1004 J/mm), isso ocorreu devido a soldagem ter sido realizada manualmente por um soldador, influenciando nos parâmetros de soldagem, tendo em vista que caso a velocidade de soldagem fosse maior, a energia de soldagem diminuiria, ressaltando que no CP5 foi o que possuiu menor velocidade de soldagem (JUERS et al, 1998; OLIVEIRA et al, 2010, CHEN et al, 2021).

A microdureza na ZAC das amostras resfriadas com água (CP1, CP3 e CP7) são até 45 % superiores que as amostras resfriadas ao ar (CP2, CP4 e CP8). A exceção nesse caso é o CP5, como descrito anteriormente.

No ponto C (metal de solda) o CP1, o CP3, o CP5 e o CP7 não apresentam diferença significativa no intervalo de

confiança de 95 % nos valores de microdureza quando comparado entre si. As amostras resfriadas com água (CP1, CP3, CP5 e CP7) apresentam diferença significativa no intervalo de confiança de 95 % nos valores de microdureza quando comparadas as amostras resfriadas ao ar (CP2, CP4, CP6 e CP8), figura 9c.

O metal de solda (ponto C) alcançou os maiores valores de microdureza entre todas as regiões analisadas, figura 9d. O resfriamento com água pode aumentar em até quase 70 % (CP1 em relação ao CP2) o valor de microdureza no ponto C.

Essa diferença no metal de solda (ponto C) pode estar relacionado a duas características na microestrutura dessa região: a primeira é o tamanho da microestrutura, o metal de solda resfriado ao ar apresenta uma microestrutura mais grosseira quando comparada a microestrutura resfriada com água; a segunda característica é a fração de ferrita acicular, que é bem maior nas amostras resfriadas com água (RIGUEIRA et al, 2011; ZANG et al, 2015, OLANIPEKUN et al, 2019, GUTIÉRREZ et al, 2018, ALVARADO et al, 2012).

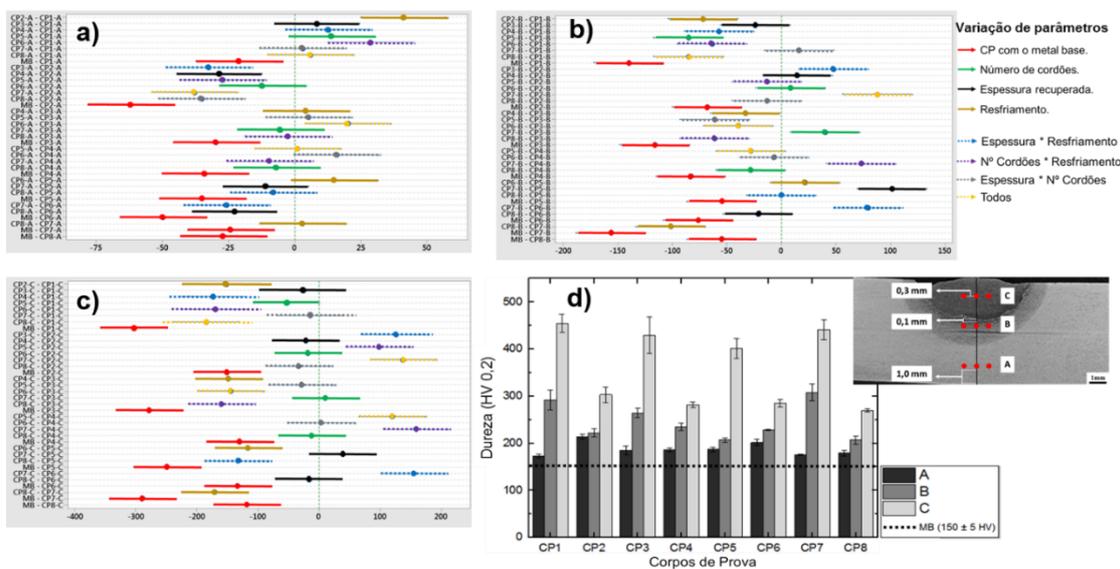


Figura 9 – Comparação estatística entre as médias dos valores de microdureza Vickers com intervalo de confiança 95%: a) ponto A; b) ponto B; c) ponto C; d) Valores médios de microdureza das amostras nas regiões A, B e C.

3.4. Influência dos fatores (tipo de resfriamento, espessura recuperada e quantidade de cordões de solda) na microdureza

Notou-se que a microdureza no ponto A foi influenciada por todos os fatores, porém o tipo de resfriamento (água ou ar) teve a maior influência, figura 10a. Esse resultado mostra que a microdureza apresenta uma tendência de aumentar conforme o resfriamento da amostra é realizado ao ar, ou seja a influência desse fator é mais evidente quando o tipo de resfriamento é feito ao ar. Por ser analisado simultaneamente de forma específica a influência entre dois fatores (T.R x N.C, T.R x E.R e N.C x E.R) no aço SAE 1020, não foi encontrado na literatura citações que expliquem estas relações.

A quantidade de cordões de solda tem a menor influência entre os fatores estudados, conforme se aumenta o número de cordões de solda, se reduz a dureza no ponto A. Isso provavelmente ocorre devido a fonte de calor estar mais afastada do ponto onde foi medido a microdureza (ponto A). Assim a relação tempo e temperatura, importante para transformações de fase em aços carbono, tem seu efeito reduzido.

O tipo de resfriamento e a quantidade de cordões de solda

apresentam interação entre si para a microdureza do ponto A. O tipo de resfriamento também apresenta interação com a espessura recuperada (E.R.) na microdureza do ponto A. Todavia, não há interação entre a quantidade de cordões de solda e a espessura recuperada (E.R.), figura 10b.

Todos os fatores analisados apresentam influência na microdureza da ZAC (ponto B), mas o tipo de resfriamento é o mais influente (figura 11a). A quantidade de cordões de solda e a espessura recuperada (E.R.) apresentam interação no comportamento da microdureza da ZAC, figura 11b. Contudo, o tipo de resfriamento e a quantidade de cordões de solda e o tipo de resfriamento e a espessura recuperada (E.R.), não apresentam interação na microdureza da ZAC (ponto B).

O metal de solda (ponto C) tem como fator de principal influência na microdureza o tipo de resfriamento, figura 12a. O tipo de resfriamento e a espessura recuperada (E.R.) apresentam interação entre si na microdureza do metal de solda. Esse tipo de interação também é obtido entre a quantidade de cordões de solda e a espessura recuperada. No entanto, o tipo de resfriamento e a quantidade de cordões de solda não apresentam interação, figura 12b.

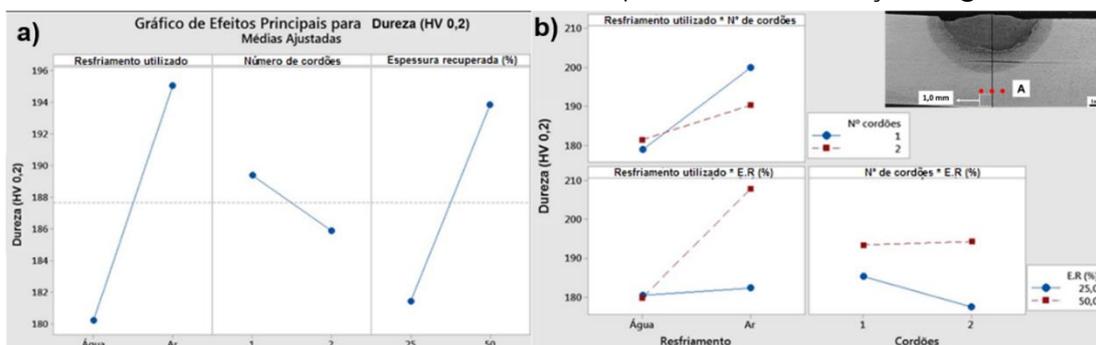


Figura 10 – No ponto A: a) influência individual de cada fator no comportamento da microdureza; b) interação entre os fatores analisados com a microdureza.

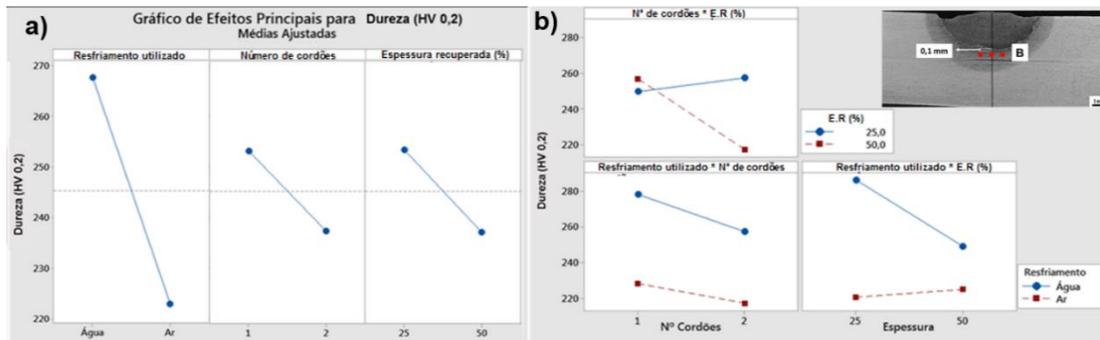


Figura 11 – No ponto B: a) influência individual de cada fator no comportamento da microdureza; b) interação entre os fatores analisados com a microdureza.

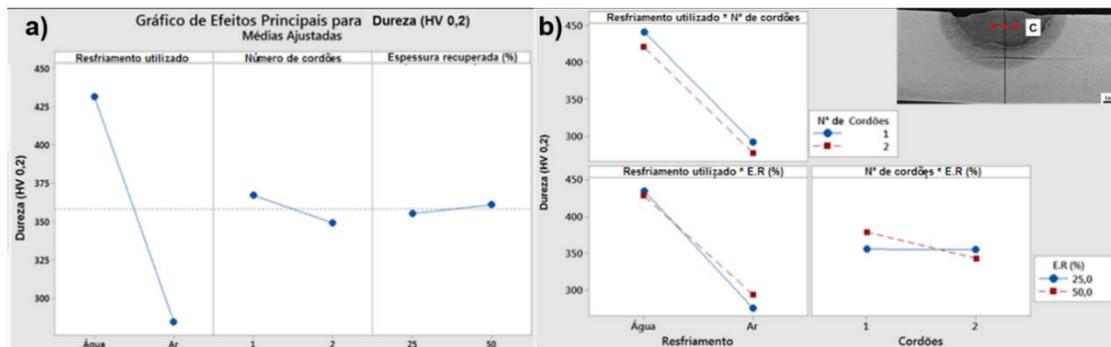


Figura 12 – No ponto C: a) influência individual de cada fator no comportamento da microdureza; b) interação entre os fatores analisados com a microdureza.

4. Conclusões

- A microestrutura da zona afetada pelo calor e do metal de solda não apresentam modificações nas amostras resfriadas com água.
- A retirada de calor causada pelo sistema de resfriamento com água reduziu a área da ZAC de todos os experimentos quando comparados aos experimentos que tiveram o resfriamento ao ar. A área da ZAC do CP2 é 216% maior que a ZAC do CP1, a área da ZAC do CP4 é 205 % maior que a ZAC do CP3, a área da ZAC do CP6 é 120% maior que a ZAC do CP5 e a área da ZAC do CP8 é 135 % maior que a ZAC do CP7.
- A microdureza na ZAC das amostras resfriadas com água (CP1, CP3 e CP7) são até 45 % superiores que as amostras resfriadas ao ar (CP2, CP4 e CP8), e o resfriamento com água pode aumentar em até 70%

(relação CP1 e CP2) o valor de microdureza no metal de solda.

- O tipo de resfriamento é o fator que possui maior influência na microdureza no metal de solda (ponto C), na zona afetada pelo calor (ponto B), e na região mais próxima da face oposta à soldagem (ponto A).
- A região mais próxima da face oposta à soldagem (ponto A) tem sua microdureza aumentada em todos os corpos de prova quando comparado com metal de base.
- A interação dos fatores: tipo de resfriamento e espessura recuperada (E.R.); e quantidade de cordões e espessura recuperada (E.R.), tem influência na microdureza do metal de solda (ponto C).
- A interação dos fatores: quantidade de cordões de solda e espessura recuperada (E.R.) tem influência na



microdureza da zona afetada pelo calor (ponto B).

Divulgação

Este artigo é inédito e não está sendo considerado para qualquer outra publicação. Os autores e revisores não relataram qualquer conflito de interesse durante a sua avaliação. Logo, a revista *Scientia Amazonia* detém os direitos autorais, tem a aprovação e a permissão dos autores para divulgação, deste artigo, por meio eletrônico.

Referências

- ALVARADO, J.; GUTIÉRREZ, N.; CICCIO, H. Influencia del calor de aporte en un proceso SMAW sobre los cambios microestructurales y dureza en el cordón de soldadura de un acero ASTM 572- G50 utilizando electrodos AWS E11018-G. **Conocimiento para el Desarrollo**. V. 3, n. 2, p. 113-120, 2012. Doi:
- AWS. **Welding Handbook – Welding Science and Technology**. 9ª ed. V. 1. Miami-EUA. American Welding Society, Miami, EUA, p. 573. 2001.
- AWS. **Welding Handbook: Welding Processes, Part 1**. 9ª ed. V. 2. Miami-EUA, 2004.
- BAI, Y. Pipelines and Risers. **Elsevier Ocean Engineering: Book Series**. V. 3. P. 353-380. 2001.
- BARNABAS, S.G; RAJAKARUNAKARAN, S; PANDIAN, G.S; BUHARI, A.M. Review on enhancement techniques necessary for the improvement of underwater welding. **Materials Today: Proceedings** (online), 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.725>.
- CALLISTER, W.; RETHWISCH, D. **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução**. 9ªed, V. 1, Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2016.
- CHANGQING, G.; FRANGOPOL, D.M. Preferred dry-docking interval of corroded ship hull girders based on cumulative prospect theory. **Ocean Engineering**. V. 192. 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106440>.
- CHEN, S.; HE, T.; ZHAO, Z.; TSANG, D. Microstructure and mechanical response of gas tungsten arc welded joints comprising a UNS N10003 alloy with different heat inputs. **Materials Science & Engineering**. V. 803, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140494>.
- FARIA, P.; SOARES, J.; ARAUJO, F.; Paranhos, P. Soldagem em Operação: Parte 1 - Efeito do Arrefecimento Causado pelo Fluido em Tubulação de Espessura 11 mm. **Soldagem & Inspeção**. V. 17, n. 4, p. 280-287. 2012. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0104-92242012000400002>.
- FARRAR, R. A.; HARRISON, P. L. Acicular ferrite in carbon-manganese weld metals: an overview. **Journal of Materials Science**. V. 22, p. 3812-3820. 1987. Doi: 10.1007/BF01133327.
- GUTIÉRREZ, D.; MONCALEANO, I.; BARACALDO, R. Caracterización microestructural y mecánica de aceros de fase dual (ferrita-martensita), obtenidos mediante procesos térmicos y termomecánicos. **Ingeniare - Revista chilena de ingeniería**. V. 26, n. 3, p. 430-439, 2018. Doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-3305201800030043>.
- GUTIÉRREZ, P.H; RODRÍGUEZ, F.C; MONDRAGÓN, J.J; DÁVILA, J.L; MATA, M.P; CHAVEZ, C.A. Thermo-mechanic and Microstructural Analysis of an Underwater Welding Joint. **Soldagem & Inspeção**. V. 21, n. 2. 2016. Doi: <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2102.05>.
- HONG, T.S; GHOBAKHLOO, M. Safety and Security Conditions in Welding Processes. In: Atila Incecik. **Ocean Engineering**. Vol 6, p.213-225, 2014.
- JUERS, R.H. Shielded Metal Arc Welding. **Welding, Brazing and Soldering**. Metals Handbook. Vol 6, 10 Ed. American Society of Metals, p. 558 – 569. 1998.
- LI, W.; CAO, R.; ZHU, W.; GUO, W.; JIANG, Y.; CHEN, J. Microstructure evolution and impact toughness variation for high strength steel multipass weld metals with various cooling rates. **Journal of Manufacturing Processes**. V. 65, p. 245-257, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.027>.
- MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J; BRACARENSEM A.Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG; 2009.
- MOOJEN, R.; MACHADO, I.; MAZAFERO, J.; GONZALEZ, A. Efeito da Taxa de Resfriamento na Soldagem do Aço API 5L-X80. **Soldagem & Inspeção**. V. 20, n. 1, p. 68-80, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2001.08>.



NETO, R. **Taxa de resfriamento na soldagem: um novo entendimento.** Tese de doutorado. São Paulo: USP; 2018. Doi: 10.11606/T.3.2018.tde-19092018-094750.

OGATA, P. **Caracterização Microestrutural do aço para tubo API 5L-X65 em diferentes regiões da chapa como laminada e após a austenitização e resfriamento sob diversas taxas de resfriamento.** Dissertação de mestrado. São Paulo: USP; 2009. Doi: 10.11606/D.3.2009.tde-22102009-180225.

OLANIPEKUN, A.; NTHABISENG, M.; AYODELE, O.; MPHABLELE, M.; MAMPUYA, B. OLUBAMBI, P. Datasets on the measurement of mechanical properties of ferrite and austenite constitutive phases using nanoindentation and micro hardness techniques. **Journal Data in Brief.** V. 27, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104551>.

OLIVEIRA, G.L.; SILVA, T.; MIRANDA, H.; MOTTA, M. Avaliação do Efeito da Energia de Soldagem sobre as Tensões Residuais Resultantes em Juntas Soldadas com Multipasse. **Soldagem & Inspeção**, v. 15, n. 3, p. 218-224, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0104-92242010000300008>.

OMOLE, S.; OYETUNJI, A.; ALANEME, K.; OLUBAMBI, P. Structural characterization and mechanical properties of pearlite – Enhanced micro-alloyed ductile irons. **Journal of King Saud University – Engineering Sciences.** V. 32, n. 3, p. 205-210, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2018.11.008>.

PATHAK, N.; ADRIEN, J.; BUTCHER, C.; MAIRE, E.; M, WORSWICK. Experimental stress state-dependent void nucleation behavior for advanced high strength steels. **International Journal of Mechanical Sciences.** V. 179, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105661>.

PERRET, W.; SCHWENK, C.; et al. Comparison of analytical and numerical welding temperature field calculation. **Computational Materials Science.** V. 47, no. 4. pp. 1005-1015. 2010. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2009.11.032>

PETROBRAS. **Soldagem e trepanação em equipamentos, tubulações industriais e dutos em operação.** Norma N-2163, Brasil, 2008.

RAVI, A.; KUMAR, A.; HERBIG, M.; SIETSMA, J.; SANTOFIMIA, M. Impact of austenite grain boundaries and ferrite nucleation on bainite formation in steels. **Acta Materialia.** V. 188, p. 424-434, 2020.

Doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.01.065>.

RIGUEIRA, G.; FURTADO, H.C.; LISBOA, M.B.; ALMEIDA, L.H. Evolução microestrutural e alteração de dureza na bainita e na perlita em aços 2,25Cr1Mo após tratamento de envelhecimento. **Revista Matéria.** V. 16, n. 4, p. 857-567, 2011. Doi: <https://doi.org/10.1590/S1517-70762011000400007>.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P.R. **Aços e Ligas Especiais.** 3º edição. São Paulo: editora Blucher. 2010.

SOEIRO JUNIOR, J.C.; ROCHA, D.B.; BRANDI, S.D. Uma breve revisão histórica do desenvolvimento da soldagem dos aços API para tubulações. **Soldagem & Inspeção.** v.18, n. 2, p. 176-195. 2013 Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242013000200011>.

SOUZA, G. **Efeito do resfriamento no teor de oxigênio na soldagem com eletrodo revestido E7018 utilizando experimentos fatoriais.** Dissertação de mestrado. São Paulo: Poli-USP; 2018. Doi: 10.11606/D.3.2018.tde-24092018-111903.

SOUZA, G.; ALVES, N.; DALPIAZ, G.; CASANOVA, J.; BRANDI, S. A Comparison Between Air and In-Service Welding on Oxygen Concentration and Microinclusions in E7018-1 Weld Metal. **Journal of Pressure Vessel Technology.** v. 143, n. 5, p. 1-7. 2021. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.4050221>.

SOUZA, K. **Influência do processo de soldagem sobre as propriedades mecânicas de juntas soldadas de tubulações de aço API 5L X60.** Dissertação de mestrado. Campina Grande: UFPB, 2003.

STENBACKA, N.; CHOQUET, I. Arc Efficiency Values for Gas Tungsten Arc Welding. **Soldagem & Inspeção.** v. 18, n. 4, p. 1-21. 2013. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0104-92242013000400010>

TANIGUCHI, C. Metalurgia de Soldagem. In: Emílio Wainer, Sérgio Duarte Brandi, Fábio Décourt Homem de Mello. **Soldagem: Processos e Metalurgia.** 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA. p. 359-425. 2004.

WU, Q; HAN, T.; WANG, Y.; WANG, H.; ZHANG, H; GU, S. In-situ observation of high-temperature failure behavior of pipeline steel and investigation on burn-through mechanism during in-service welding. **Engineering Failure Analysis.** V. 109. 2019.



Engenharia

Scientia Amazonia, v. 10, n.2, E1-E14, 2021
Revista on-line <http://www.scientia-amazonia.org>
ISSN:2238.1910

Doi: <https://doi.org/10.1016/j.eng-failanal.2019.104236>.

ZANG, L.; PITTNER, A.; RHODE, M.; KANNENGIES-SER, T. Effect of cooling rate on microstructure and properties of microalloyed HSLA steel weld metals. **Science and Technology of Welding and Joining**. V. 20, n. 5, P. 371-377. 2015. Doi: <https://doi.org/10.1179/1362171815Y.0000000026>.