

INFLUÊNCIA DA TRAJETÓRIA DE SOLDAGEM NA DUREZA E MICROESTRUTURA DE PEÇAS DE FECRC COM ADIÇÃO DE NB FABRICADAS PELO PROCESSO MADA

Lúcio Mateus Santana Carvalho, luciocarvalho@discente.ufg.br¹

Demostenes Ferreira Filho, demostenesferreira@ufg.br¹

Renata Rodrigues Alves, renata_rodrigues@ufg.br¹

Vitória Ferreira de Oliveira Marques, marques_vitoria@discente.ufg.br¹

¹Universidade Federal de Goiás, Al. Ingá, Prédio B5 Eng. Mecânica, CEP: 74.690-900 - Goiânia – Goiás – Brasil.

Resumo. *Por meio do processo de soldagem utilizando arame tubular FCAW, liga FeCrC-Nb, foi possível fabricar peças de elevados valores de dureza. Este trabalho avaliou o uso de trajetórias de soldagem distintas para analisar os valores de dureza nas diferentes regiões da peça manufaturada por FCAW, com o modo de transferência a curto-circuito. Fabricou-se uma roldana, utilizando uma trajetória de tecomimento e outra utilizando uma trajetória de círculos concêntricos (CC). O ensaio de dureza foi realizado em três regiões distintas: região mais externa à roldana, A, região central, B, e região mais interna, C. Pela análise microestrutural pode-se observar que a presença de carbonetos primários M_7C_3 e NbC, interferiram nos valores das durezas. Os resultados demonstram que a trajetória de tecomimento apresenta dureza mais elevada nas regiões mais distantes da extremidade externa, enquanto na trajetória CC apresentou maior valor de dureza no centro da roldana. De modo geral, a trajetória de tecomimento apresentou dureza mais elevada que a trajetória de CC, sendo justificado pela maior presença de carbonetos duros. Devido a elevada dureza a amostra de trajetória de tecomimento apresentou mais trincas ao longo da solda.*

Palavras chave: FeCrC-Nb; Trajetória de soldagem; Dureza; Microestrutura; Carbonetos.

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) utiliza de processos de soldagem para a criação de diversos objetos e peças, por meio de transferências metálicas. A MADA é a preferida das indústrias por moldar uma variedade de materiais metálicos, ter alta eficiência de deposição e por possibilitar a construção de estruturas complexas (LIU et al, 2020). Utilizando o processo de revestimento duro é possível fabricar peças com elevada dureza e durabilidade por meio da MADA, como demonstra LI et. al. (2019). Os estudos acerca deste tipo de fabricação são demasiadamente importantes pois, como exposto por Paranhos (2010), toda a utilização de processos de soldagem, que são utilizados na MADA, com revestimento duro é muito emergente e valioso para as indústrias, uma vez que o mesmo economiza tempo, dinheiro e fornece maior durabilidade a ferramentas e peças.

A soldagem com eletrodo tubular FCAW (Flux Cored Arc Welding) apresenta alta qualidade do metal de solda depositado, é um processo facilmente mecanizado, apresenta alta taxa de deposição e permite trabalhar com parâmetros de soldagem altos, como tensão, corrente e velocidade de soldagem. Juntamente com a MADA feita por um manipulador robótico, a utilização de eletrodo tubular para a soldagem maximiza a produtividade e elimina a necessidade de um gás de proteção para a poça de fusão (MARQUES et. al., 2005).

Os principais parâmetros controlados pelo operador, que fazem variar os modos de transferência na soldagem FCAW, são a tensão e velocidade de alimentação do arame, no caso do presente estudo ambos são controlados na fonte, uma vez que o processo é automatizado por meio de um manipulador robótico. O modo de transferência selecionado para este estudo foi a soldagem por curto-circuito devido a sua ampla utilização na indústria por sua grande produtividade; possibilitar soldar em qualquer posição, sendo uma ótima característica para a confecção de peças complexas; ter um ótimo controle sobre a deposição do metal de adição, controlando melhor a transferência de calor para o metal base do que no modo de transferência globular; e utilizar valores de tensão e corrente baixos em comparação ao modo de transferência goticular (spray), economizando energia no processo (MARQUES et al, 2005).

As ligas de FeCrC-Nb são utilizadas em revestimento duro por aumentarem a durabilidade de peças e ferramentas (SOUZA e FERRARESI, 2017). Como analisado por LIMA (2008), a presença de carbonetos de alto teor de cromo M_7C_3 ,

juntamente com carbonetos primários de nióbio NbC, aumenta a dureza dos materiais e melhora a resistência ao desgaste da peça. O NbC é um elemento nucleador e refinador de carbonetos, então sua presença faz com que a microestrutura seja mais refinada, e com microestruturas mais refinadas haverá menos propensão a propagação de trincas de solidificação (DVORNAK, et. al. 1991, apud LUZ, et. al. 2020).

Para que a deposição do arame de solda seja feita é necessário escolher como será a trajetória da solda, realizada pelo manipulador robótico. Tal trajetória guia principalmente a espessura da peça final e como será feita a solda, tendo interferência nas características mecânicas da peça, como por exemplo na dureza.

Neste estudo, objetiva-se a análise de o quanto a diferença entre uma peça feita com a trajetória de tecimento e outra feita com a trajetória de círculos concêntricos (CC), interfere na dureza das roldanas, sendo esta uma peça circular feita inteiriça de material duro e que foi manufaturada neste estudo. Na trajetória por tecimento a solda é feita em um movimento dito tecimento, onde a tocha realiza movimentos triangulares para que se atinja a espessura requerida para a peça, enquanto faz o movimento circular para formar a roldana. A tocha irá realizar tais movimentos, programados no manipulador robótico, enquanto o arame é depositado e soldado, realizando a manufatura da peça. Assim, após finalizada uma camada, o manipulador realiza o comando onde a tocha sobe e inicia uma nova camada com a mesma trajetória, até que se faça o número requerido de camadas. Diferentemente da trajetória por tecimento, a trajetória por círculos concêntricos não realiza nenhum movimento diferente que teça a solda, apenas trajetórias constantes que no caso da roldana imprime três circunferências e após o comando para subir confecciona outras circunferências concêntricas às de baixo até que se atinja o número exigido de camadas.

2. METODOLOGIA

2.1. Materiais e métodos para a soldagem

Neste estudo foi utilizado, como metal de adição, o arame tubular auto-protégido UTP AF Ledurit 68 de 1,6 mm de espessura, sendo este uma liga de Ferro-Cromo-Carbono-Nióbio (FeCrC-Nb). Utilizou-se tal liga para fornecer à peça um revestimento duro, com dureza elevada, segundo UTP 2018, entre 772 e 832 HV. Encontra-se na Tabela 1 a composição química deste arame. Como substrato para a soldagem foram utilizados cilindros de aço A36.

Tabela 1. Composição química do arame tubular auto-protégido UTP AF Ledurit 68 (Adaptado UTP, 2018)

Porcentagem (%)				
C	Si	Mn	Cr	Nb
5,5	0,3	0,3	22,0	7,0

A manufatura aditiva utilizando o processo FCAW foi realizada pelo manipulador robótico Yaskawa Motoman HP20, onde foram programadas as trajetórias e modificados os parâmetros de soldagem, para que fossem realizadas as confecções das roldanas.



Figura 1. Manipulador robótico utilizado para a MADA com FCAW

Para a manufatura das peças, o manipulador robótico foi programado com dois movimentos de trajetórias. Na Figura 2(a) é demonstrado como a tocha realiza a trajetória de círculos concêntricos (CC), realizando-se o deslocamento de três circunferências com trajetetos lineares por camada. Já a Figura 2(b) apresenta a trajetória de tecimento, realizada pela tocha, realizando-se uma única circunferência com tecimento (oscilação lateral) por camada. Foram feitas 5 camadas de espessura para cada peça. Para a soldagem, os parâmetros escolhidos e utilizados estão apresentados na Tabela 2.

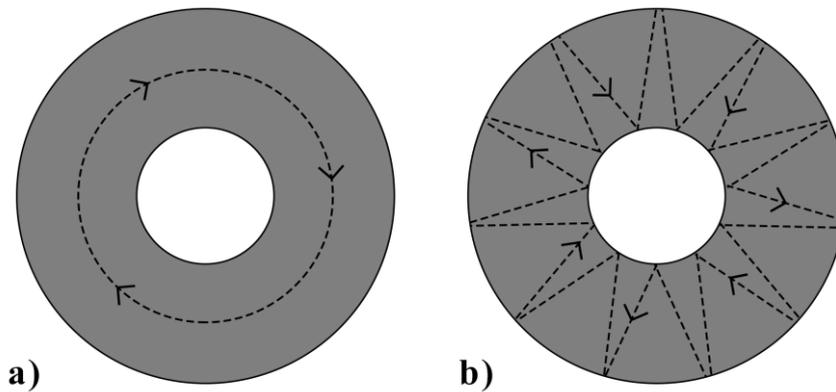


Figura 2. Representação das trajetórias realizadas pela tocha no processo FCAW: a) Círculos concêntricos; b) Tecimento

Tabela 2. Parâmetros de soldagem, processo FCAW

Tensão (V)	20	
Velocidade de alimentação (m/min)	1,7	
Amplitude	5	
DBCP (mm)	12	
Velocidade de soldagem (cm/min)	Para tecimento	10
	Para círculos concêntricos	30

As peças manufaturadas são apresentadas na Fig. 3. Visando a obtenção de um melhor acabamento superficial, planificando a superfície, e também para que o ensaio de dureza seja realizado internamente à peça, sem ser em cima do cordão de solda, realizou-se o processo de retificação, utilizando a retífica plana Atlasmaq RPA-800. Os parâmetros para a retificação foram profundidade de 0,010 mm e avanço de 100 mm/100.

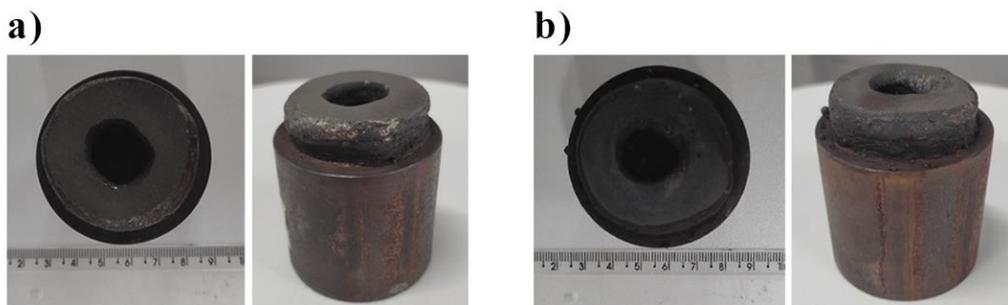


Figura 3. Roldanas manufaturadas: a) Trajetória de tecimento; b) Trajetória de CC

2.2. Medição de dureza e microdureza

O ensaio de dureza foi realizado de acordo com a norma ASTM E 92-82 (2003), utilizando o durômetro da marca Mitutoyo modelo HV-100. Os parâmetros selecionados para o teste foram uma força de 10 kgf aplicada durante 15 segundos. Esta carga foi selecionada visando realizar uma medida de dureza geral que englobasse tanto a matriz quanto os precipitados. Foram, então, realizadas 7 medições no decorrer de cada uma das linhas tracejadas nas regiões A, B e C, descritos na Fig. 4, para ambas as roldanas.

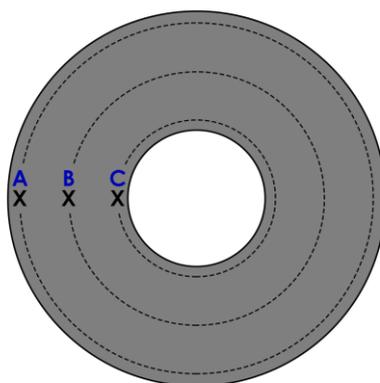


Figura 4. Linhas tracejadas representando onde foram feitas as medições de dureza para as regiões A, B e C

A região A mede a dureza na extremidade mais perto da borda externa da roldana, a região B mede a dureza no meio da roldana e a região C mede a dureza na extremidade mais interna da roldana. Por fim, foram desconsideradas a maior e a menor medição, a fim de minimizar os erros experimentais, obtendo os valores médios com as 5 medidas restantes. Foi calculada a incerteza estimada da média à tal processo e por fim foi gerado um gráfico comparativo entre as medidas de dureza nas regiões A, B e C entre as roldanas feitas com trajetórias por tecimento e por círculos concêntricos, Fig. 10.

A fim de analisar a microdureza da microestrutura foi realizado um ensaio de microdureza Vickers, com equipamento da marca Mitutoyo modelo HM-200. Os parâmetros selecionados para o teste foram uma força de 0,05 kgf aplicada durante 15 segundos. Foram realizadas 3 (três) medições na matriz e nos carbonetos.

2.3. Microscopia e metalografia

Para a análise metalográfica, foi cortada uma amostra de cada peça. Em seguida estas amostras foram embutidas utilizando uma resina de embutimento a quente fenólica. Então, elas foram lixadas com lixas de granulometria 400, 600 e 1200, e por fim realizou-se o polimento das mesmas com pasta de diamante com granulometria de 1 μ m. A forma final pode ser observada na Figura 5.

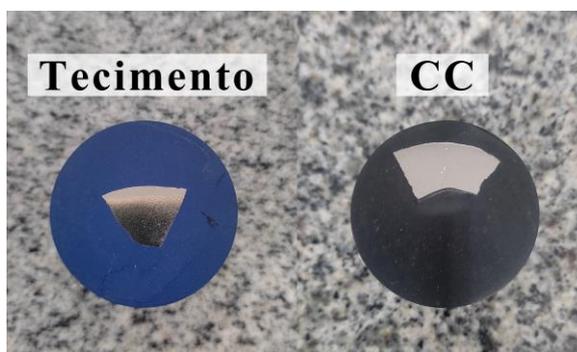


Figura 5. Amostras das peças embutidas e lixadas

Para o procedimento de ataque químico, a amostra da trajetória de tecimento foi imergida por 15 segundos em Água Régia (8 ml HNO₃ + 12 ml HCl + álcool etílico), já a amostra da trajetória de círculos concêntricos ficou imersa por 20 segundos. Em seguida, as amostras foram lavadas com álcool etílico e secas a quente. Para a microscopia foi utilizado o microscópio Axio da marca Zeiss, modelo Imager.M2m.

3. RESULTADOS

3.1. Análise dos parâmetros de soldagem

A Figura 7 apresenta gráficos da corrente e tensão de soldagem pelo tempo, a fim de se analisar como se comportam estes parâmetros durante os curtos-circuitos no processo FCAW. Nota-se que ocorrem curtos durante a soldagem pois a corrente, Fig. 7(a), aumenta muito e tem seu valor levado próximo de zero abruptamente, tendo seu valor médio de 71 A. Já a tensão de soldagem, Fig. 7(b), se mantém próximo de seu valor médio que foi programado na fonte de 20 V.

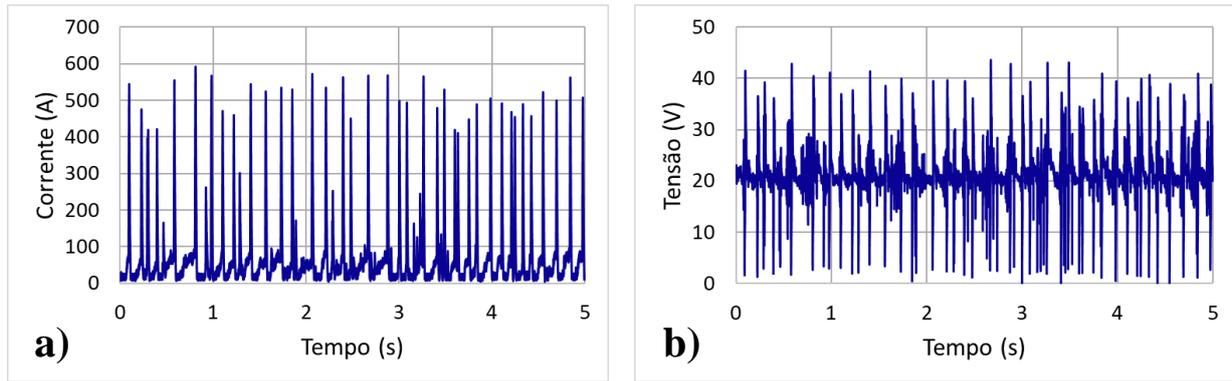


Figura 7. a) gráfico de corrente (A) pelo tempo (s); b) gráfico de tensão (V) pelo tempo (s)

3.2. Análise das microestruturas

As microestruturas que se podem notar no material FeCrC-Nb, utilizando o arame com os teores de elementos apresentados na Tab. 1, foram também observadas por SOUZA e FERRARESI (2017), onde em seu trabalho é possível notar microestruturas de morfologia hexagonal e em forma de agulha que são carbonetos primários M_7C_3 , que são formadas por austenita em uma matriz eutética e devido ao alto teor de Cromo são bem perceptíveis, e também carbonetos de Níobio NbC. As Figuras 8 e 9 apresentam provavelmente tais carbonetos nas 3 regiões distintas A, B e C de ambas as roldanas, mas análises complementares em MEV e DRX seriam necessárias para confirmação dessas formações, apesar das microestruturas demonstrarem compatibilidade visual com o trabalho de SOUZA e FERRARESI (2017).

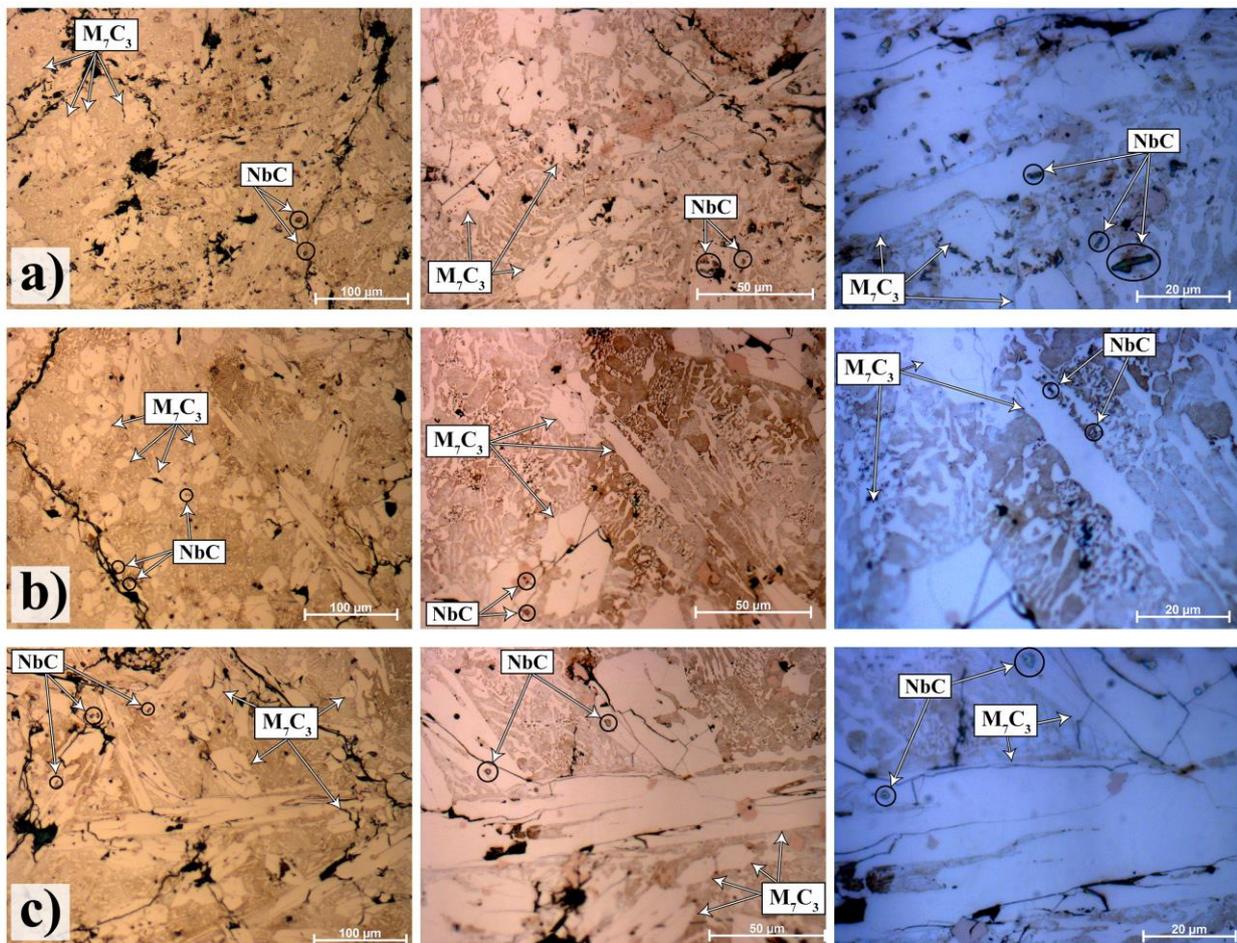


Figura 8. Microestruturas presentes no FeCrC-Nb obtidas pelo processo FCAW com trajetória de círculos concêntricos. Tem-se ampliações de 200x, 500x e 1000x, respectivamente, para as medições nas regiões: a) A; b) B; c) C

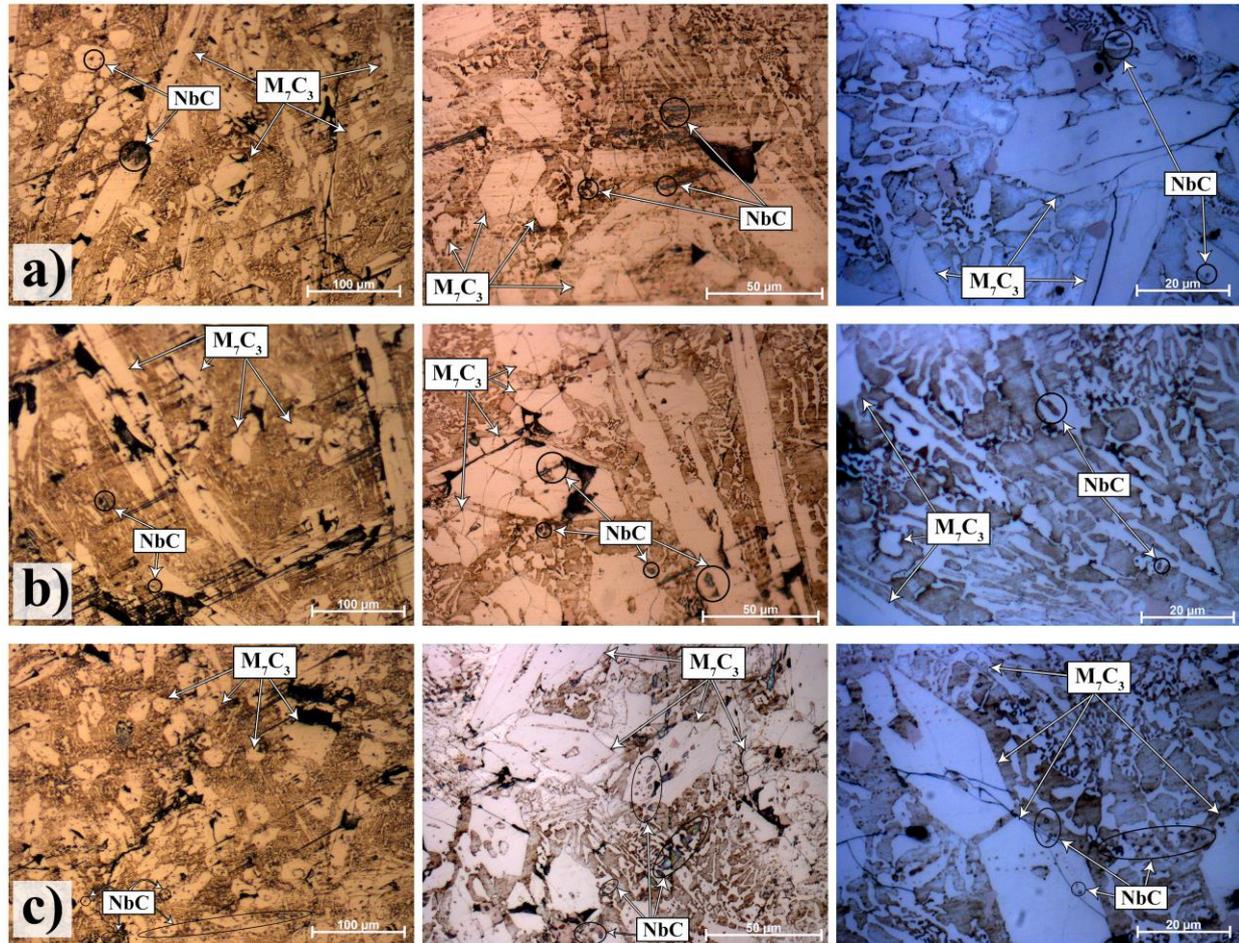


Figura 9. Microestruturas presentes no FeCrC-Nb obtidas pelo processo FCAW com trajetória de tecimento. Tem-se ampliações de 200x, 500x e 1000x, respectivamente, para as medições nas regiões: a) A; b) B; c) C

A Figura 8 apresenta os resultados de microestrutura da roldana revestida com trajetória CC. A região que apresenta visualmente maior proporção de carbonetos e com menor espaçamento entre eles é a região B, tendo em vista que os carbonetos M_7C_3 e NbC são carbonetos de elevada dureza, segundo o ensaio de microdureza descrito na seção 3.2 e também WANG e LI (2010, apud LUZ, et. al. 2020), tal arranjo justifica o aumento de dureza na região B em relação às outras regiões para amostra de trajetória de CC.

Para a roldana feita com trajetória de tecimento, a região C, Fig. 9(c), apresenta os carbonetos M_7C_3 e NbC visualmente em maior proporção e com menor espaçamento entre os mesmos, se comparada a região A e B, Fig. 9(a-b). O que justifica a região C apresentar a maior dureza em relação às demais regiões.

Fazendo uma comparação entre as regiões de ambas as roldanas, nota-se visualmente que para a região A, Fig. 4, o número de carbonetos M_7C_3 e NbC é bastante parecido tanto na feita com trajetória de CC quanto de tecimento, Fig. 8(a) e Fig. 9(a). Pressupõe-se, então, que este fato fez com que os valores de dureza para esta região em ambas as roldanas fossem relativamente próximos, Fig. 10, sendo cobertos pelas suas incertezas. Para a região B, Figura 4, percebe-se visualmente que os carbonetos estão com espaçamentos bem menores entre eles na trajetória de tecimento, Fig. 9(b), do que na de CC, Fig. 8(b). Isto fica mais evidente na ampliação de 500x e pressupõe-se que foi o principal fator para a diferença considerável de dureza entre as roldanas, Fig. 10, para a região B. Analisando a região C, é perceptível que esta região na roldana feita com trajetória de tecimento, Fig. 9(c), apresenta visualmente um número bastante superior de carbonetos M_7C_3 e também NbC, além de seus espaçamentos serem bem pequenos e seus tamanhos menores, se comparada a mesma região na roldana feita com trajetória de CC, Fig. 8(c). Esta diferença é bastante notável e é validada nos ensaios de dureza, exposto na Fig. 10. Uma possível justificativa para esse fenômeno é o acúmulo de material e a concentração maior durante o tempo da soldagem da tocha de soldagem na região C da trajetória por tecimento, causando a diferença de dureza entre às regiões em trajetórias diferentes. A comparação entre as diferentes trajetórias também demonstra a maior presença de carbonetos NbC na roldana feita por trajetória de tecimento em contrapartida à feita com trajetória de CC.

Nas Figuras 8 e 9 também é possível verificar trincas de contração ou de solidificação nas microestruturas dos carbonetos, devido a sua baixa ductilidade. Estas trincas também foram observadas por LUZ et. al. (2020), sendo trincas

normalmente transversais que aliviam as tensões residuais do cordão de solda, e pela presença de Nb, que é um elemento nucleador e refinador de carbonetos, resultam em uma microestrutura mais refinada. Observa-se, pela microscopia, que os carbonetos M_7C_3 da trajetória de tecimento, Fig. 9, apresentam mais trincas se comparados com os da trajetória de CC, Fig. 8. Para ensaios futuros a análise com líquido penetrante se vê interessante para maior esclarecimento.

3.3. Ensaio de dureza e microdureza

No ensaio de microdureza, o carboneto primário de cromo M_7C_3 , apresentou dureza de (1274 ± 155) HV, o que está de acordo com a literatura (WANG e LI, 2010, apud LUZ, 2020), enquanto a matriz eutética possui uma dureza de (763 ± 75) HV. Para averiguar a microdureza do carboneto de nióbio é necessário um ensaio de nanodureza, entretanto, segundo WANG e LI (2010, apud LUZ, et. al. 2020), a dureza do NbC é de até 2500 HV.

Utilizando o método de medição de dureza apresentado, foram obtidos os valores médios de dureza referentes a cada uma das regiões apresentadas na Fig. 4. Temos que, para a roldana feita com Trajetória de Círculos Concêntricos, o valor médio da dureza na região A foi de $(730,4 \pm 11,7)$ HV₁₀; para a região B foi de $(745,1 \pm 6,3)$ HV₁₀; e para a região C $(715,0 \pm 14,3)$ HV₁₀. Para a roldana feita com Trajetória de Tecimento, temos na região A o valor médio de $(720,5 \pm 9,9)$ HV₁₀ para a dureza; na região B $(774,6 \pm 10,7)$ HV₁₀; e para a região C $(783,7 \pm 17,9)$ HV₁₀. A Figura 10 apresenta um gráfico demonstrando a relação entre as diferenças nas durezas das roldanas, a depender do tipo de trajetória e da região de análise. O comportamento da dureza na trajetória de tecimento sucede um aumento gradual da mesma, já na trajetória de CC ocorre um leve aumento da dureza, na região B, seguido de uma queda.

Nota-se que para a região A não se tem diferença entre as medições, pois as incertezas se chocam, já em B a diferença entre as durezas passa a ser significativa e em C esta diferença é bastante considerável. Por resultado, tem-se que a trajetória de tecimento apresentou durezas maiores do que a trajetória de CC nas regiões B e C, sendo estatisticamente igual nas extremidades externas das roldanas.

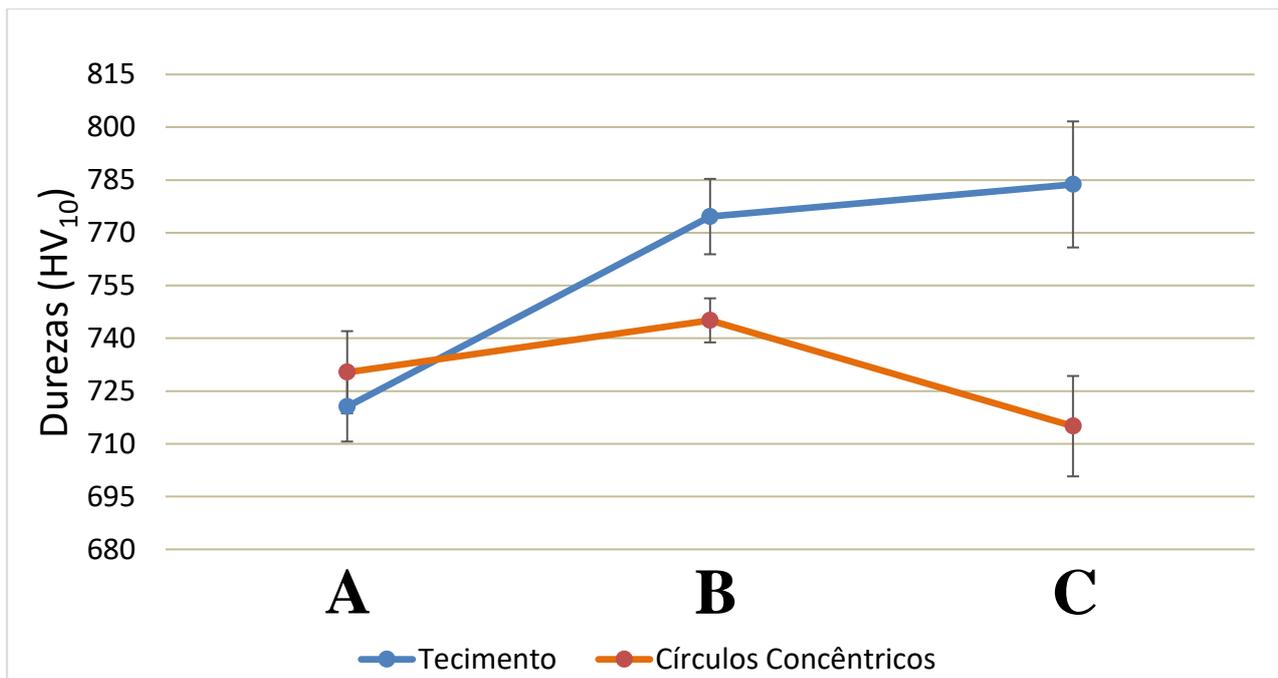


Figura 10. Gráfico de comparação das durezas nas regiões das roldanas variando as trajetórias

4. CONCLUSÕES

A amostra de trajetória de tecimento apresentou durezas maiores nas regiões B e C, e valor de dureza estatisticamente igual na região A, se comparada com a roldana feita com trajetória de círculos concêntricos (CC). Esse fenômeno pode ser explicado devido ao acúmulo de material ser maior na trajetória de tecimento em comparação com a trajetória de CC. A trajetória de tecimento apresentou um aumento gradual das durezas nas regiões. Esse fenômeno pode ser explicado pelo aumento gradual de precipitados de carbonetos. Já na amostra soldada com trajetória de CC, a região de maior dureza foi o centro da roldana. A explicação para tal pode ser devido ao maior acúmulo de material no centro da trajetória de CC. A região C ainda apresentou um valor de dureza maior do que a região A, o que também pode ser devido à região C acumular mais material do que a região A, por ser mais concentrada.

Ademais, a trajetória de tecimento apresentou maior quantidade de trincas se comparada a trajetória de CC. Isso demonstra que quanto maior a dureza, mais trincas irão se formar nos carbonetos.

Por fim, pode-se concluir que para a liga de FeCrC-Nb, a trajetória de tecimento fornece maior dureza na região mais interna da peça, e a trajetória de círculos concêntricos na região mais central. E em média a trajetória de tecimento fornece maior dureza a peça.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Programa de Educação Tutorial, ao Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação, ao Ministério da Educação e aos técnicos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás.

6. REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM E 92 – 82 (Reapproved 2003): Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials. United States, 2003.
- Li, Z., Cui, Y., Wang, J., Liu, C., Wang, J., Xu, T., Lu, T., Zhang, H., Lu, J., Ma, S., Fan, H., Tang, S. Characterization of Microstructure and Mechanical Properties of Stellite 6 Part Fabricated by Wire Arc Additive Manufacturing. v. 9, In *MDPI – Journal Metals*, 2019. E-book. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/met9040474>>. Acesso em: 01 dez. 2021.
- Lima, A. C. Estudo da aplicação de revestimento duro por soldagem com arames tubulares quanto à resistência ao desgaste de facas picadoras de cana-de-açúcar. *Tese de doutorado*, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2008.
- Liu, J., Yanling, X., Ge, Y., Hou, Z., Chen, S. Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments. Londres: Springer-Verlag Ltda, 2020.
- Luz, A.H.S., Teixeira, F.R., Junior, M.A.B.P., Mota, C.A.M., et al. Aspectos microestruturais e do comportamento mecânico de revestimento duro depositado pelo processo arame tubular. V. 25, In *Revista Matéria*, 2020. Disponível em: <<https://revistas.ufrj.br/index.php/rm/article/view/37051/20270>>. Acesso em: 30 jan, 2023.
- Marques, P. V., Modenesi, P. J., Bracarense, A. Q. Soldagem – Fundamentos e Tecnologia, Editora UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2005.
- Paranhos, R. P.R. Especialista fala da importância da soldagem para o setor. In *Jornal ProCana*, 2010. Disponível em: <<https://jornalcana.com.br/especialista-fala-da-importancia-da-soldagem-para-o-setor>>. Acesso em: 27 jan, 2023.
- Souza, D. D. B. G, Ferraresi, V. A. Aplicação de revestimento duro utilizando o processo FCAW duplo arame para diferentes tipos de consumíveis utilizados na indústria sucroalcooleira. V. 22, In *Revista Matéria*, 2017. Disponível em: <<https://revistas.ufrj.br/index.php/rm/article/view/13705/9358>>. Acesso em: 27 jan, 2023.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.