V CONEPETRO
V Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ANÁLISE DA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARAMES UTILIZADOS EM ARMADURA DE TRAÇÃO EM CABOS UMBILICAIS *OFFSHORE* SOLDADOS POR FRICÇÃO ROTATIVA

Matheus Mariano da Silva Reis[1] ; Emanoel Carlos Simas Barboza[2] ;Jhonata do Nascimento Santos[3] ; Lucas do Nascimento Silva[4] ; Sandro Griza[5]

[1]*Universidade Federal de Sergipe, Programa de Pós-Graduação Em Ciência e Engenharia de Materiais – mmariano641@gmail.com*
[2]*Universidade Federal de Sergipe, Programa de Pós-Graduação Em Ciência e Engenharia de Materiais – emanoel589@gmail.com*
[3]*Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Mecânica – jhonatanascimento60@gmail.com*
[4]*Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Mecânica – lucasnascisilva430@gmail.com*
[5]*Universidade Federal de Sergipe, Programa de Pós-Graduação Em Ciência e Engenharia de Materiais – Sandro.griza@gmail.com*

Resumo: O sistema de produção submarino é composto por diversos equipamentos e componentes que em conjunto realizam o processo de exploração de poços de petróleo e gás nas profundezas marinhas. O cabo umbilical, é um componente responsável por auxiliar no monitoramento remoto de parâmetros de variáveis como temperatura e pressão durante o processo de extração. Este cabo é composto no seu interior por diversas camadas contendo componentes funcionais e estruturais. Dentro deste contexto, está a armadura de tração, responsável por suportar esforços mecânicos como cargas axiais e cíclicas. Esta resistência é conferida através da união de um conjunto de arames de aço, médio e alto carbono, como o cabo umbilical possui dimensões quilométricas, os arames necessitam ser unidos através de soldas para ocupar toda extensão do cabo. Dessa forma, se faz necessário que o processo de soldagem seja efetivo e promova união entre as partes sem afetar de forma significativa a resistência dos arames. Com isso, este estudo traz a técnica de soldagem por fricção rotativa como alternativa à aplicação deste processo na união dos arames de armadura de tração. Diante dos resultados, a técnica se mostrou promissora, pois apresentou bom desempenho mecânico, com valores médios de tração e dureza. No entanto, a presença da microestrutura martensítica formada durante o processo de soldagem ainda é um fator a se corrigir no processo, dada a susceptibilidade à fragilização nesta região.

Palavras-chave: Cabo umbilical submarino, offshore, armadura de tração, soldagem.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por recursos energéticos no mundo tem influenciado em uma contínua e extensa busca por regiões ainda não exploradas na indústria de petróleo e gás. Historicamente a extração de petróleo e gás era realizada em lâminas d'água rasas, com o passar dos anos acompanhado de grande evolução tecnológica para este fim, a exploração de recursos naturais progrediu para lâminas d´águas cada vez mais profundas e com isso tornou-se necessário o aperfeiçoamento tecnológico dos equipamentos e componentes utilizados, para resistirem às dificuldades inerentes às profundezas do mar (AMAECHI *et al*, 2022).

O sistema utilizado para realização da exploração de óleo e gás nas profundezas marinhas, é composto por diversos equipamentos e componentes que auxiliam na realização segura e eficaz

durante o processo. Dentro deste sistema de produção submarina estão os cabos umbilicais, este equipamento é de suma importância, pois possibilita o monitoramento remoto de diversas variáveis durante o processo de exploração, conduzindo energia, fluidos além de auxiliar no controle de temperatura e pressão. Estas funções são realizadas por componentes que são instalados no interior do cabo durante a sua montagem (NASCIMENTO *et al*, 2019).

O cabo umbilical é composto por componentes funcionais, como mangueiras poliméricas, tubos metálicos e cabos elétricos, que são responsáveis pela injeção de fluidos e fornecimento de sinais elétricos. A segunda classe de componentes são os estruturais, formados por preenchimento e revestimento polimérico, e a armadura de tração que resiste toda carga axial durante a instalação e vida útil do equipamento (NASCIMENTO *et al*, 2019).

A armadura de tração é formada por um conjunto de arames de aço montados e organizados na configuração helicoidal, promovendo resistência à torção e tração. No entanto, como o cabo umbilical tem dimensões quilométricas, faz-se necessário a realização de soldas para união dos arames e assim compor toda a extensão do cabo. Atualmente, a técnica mais utilizada é a soldagem de topo por resistência, que se trata de um processo de soldagem autógena, ou seja, não faz uso de material de adição, e proporciona soldas rápidas através da passagem de corrente elétrica. Porém, este modo de soldagem gera alterações microestruturais associadas à dificuldade em controlar parâmetros como temperatura e pressão, além da alta taxa de extração de calor durante o processo (REIS, 2023). Estes fatores acarretam na alteração das propriedades mecânicas final do material.

Em virtude disso, surge a oportunidade de explorar outras técnicas como alternativa para minimizar os problemas gerados pela soldagem por resistência. Dentro da classe de soldagem autógena está a soldagem por fricção. Este processo utiliza o atrito como forma de gerar calor e à medida que este contato intensifica, ocorre a plastificação localizada da região e posterior união entre as extremidades, sem a necessidade de fundir o material (MIR *et al*, 2022).

A soldagem por fricção rotativa é realizada através do estado sólido, com isso, elimina os defeitos gerados pela solidificação em comparação com técnicas que provocam a fundição do material. Além disso, gera pequena porção de zona termicamente afetada, reduzindo possíveis modificações geradas pela alteração microestrutural na região. Este trabalho tem o intuito de estudar as propriedades mecânicas e características microestruturais da soldagem por fricção em arames de alto teor de carbono, visando avaliar e discutir esta técnica como alternativa à soldagem comumente utilizada para esta aplicação.

2. METODOLOGIA

Soldagem por fricção rotativa

Os arames utilizados neste estudo são compostos por aço de alto teor de carbono, com 5,2mm de diâmetro e foi submetido ao processo de trefilação e posteriormente galvanizados. Inicialmente, a camada galvânica foi removida através do processo de lixamento utilizando 80 mesh para remoção total, e 600 mesh para realização do acabamento superficial. A soldagem foi realizada fazendo uso de um torno mecânico, como pode ser visto na Figura 1.

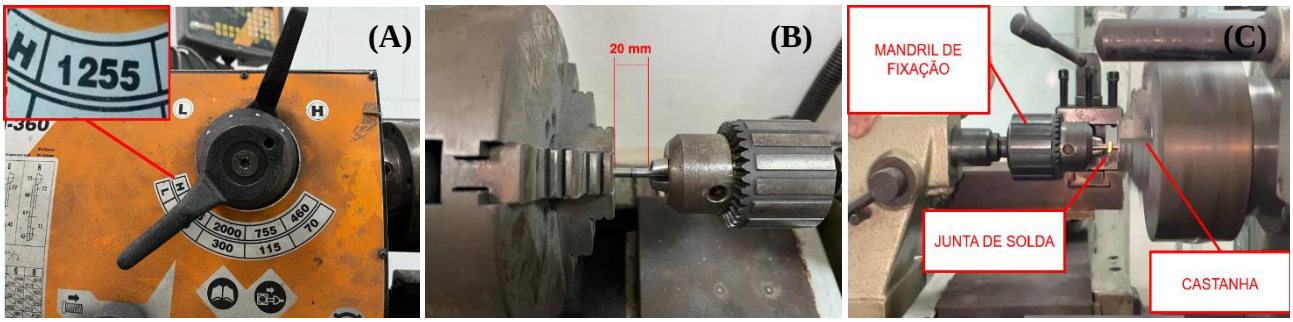


Figura 1: Processo de soldagem por fricção em torno mecânico. Velocidade selecionada para rotação (a). Fixação das partes dos arames no mandril e na castanha do torno (b). Imagem capturada durante o processo (c).
Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 1, apresenta os parâmetros utilizados para realização da solda. A Figura 2, exibe o resultado visual da solda logo após a realização do processo, e posterior ao acabamento com a retirada da rebarba e lixamento superficial.

Tabela 1: Parâmetros de soldagem realizada no torno mecânico.

Diâmetro do arame	Distância	Velocidade	Avanço
5,2 mm	20 mm	1255 rpm	2,5 mm

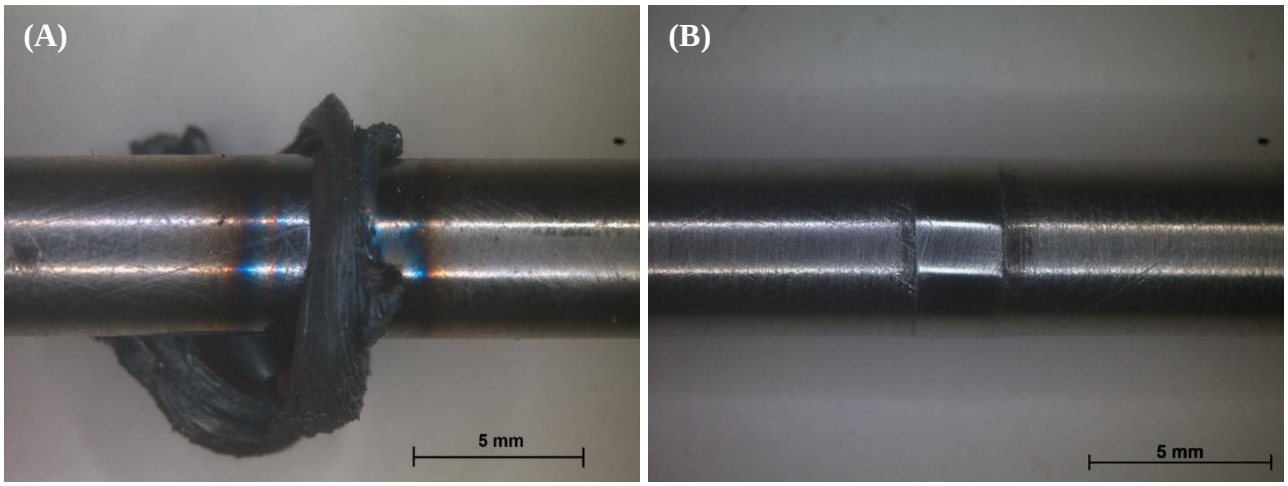


Figura 2: Aspecto visual após a soldagem, material extrudado para fora em destaque (a). Junta soldada após acabamento superficial (b).
Fonte: Autoria Própria

Caracterização microestrutural da solda

A seção soldada foi submetida ao processo de metalografia, através do plano de corte longitudinal, possibilitando identificar as zonas microestruturais da solda. A amostra foi embutida utilizando um termofixo (baquelite) com o auxílio da embutidora (Arotec PRE-30Mi). Posteriormente a amostra foi submetida ao processo de lixamento com granulometrias progressivas, partindo da 80 Mesh até 1200 Mesh, com posterior polimento por processo mecânico em politriz semiautomática, com utilização do agente polidor de pasta de diamante de 1µm. Após o polimento, a amostra teve sua microestrutura revelada através o reativo Nital 2% (9,8 ml de álcool + 0,2 ml de ácido nítrico) e

submetidas à análise de microestrutura em estereomicroscópio (Zeiss Stemi 2000C), microscópio ótico (Axio Lab.A1 da Zeiss) e Microscopia eletrônica de varredura (Tescan Vega LMS).

Microdureza Vickers

O perfil de microdureza Vickers (Future Tech FM 800) foi realizado de acordo com a norma ASTM E384-17. As impressões de microdureza foram efetuadas na mesma amostra usada na metalografia. O tempo de aplicação para cada impressão foi de 10 segundos usando carga de 1 kgf, partindo do centro da solda (CS), assumindo a região CS como ponto zero das medições, e percorrendo todas as regiões características de solda (zona de transição, zona termicamente afetada e centro de solda), seguindo longitudinalmente a cada 1 mm, na mesma amostra usada na análise metalográfica tendo deslocamentos transversais sucessivos também de 1 mm (perfil dente de serra).

Ensaio de tração

Três amostras foram submetidas ao ensaio de tração os corpos de prova tiveram 380 mm de comprimento e 5,25 mm de diâmetro. O teste foi realizado de acordo com a norma ASTM E8M, utilizando máquina servo-hidráulica MTS Landmark 370.10 com célula de carga de 100 kN e submetendo os corpos de prova a uma velocidade de deformação de 3,75 mm/min.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta a imagem macrográfica da junta soldada por fricção, apresentando as regiões encontradas: zona 1 (zona termicamente afetada), zona 2 (centro de solda) e zona 3 (metal base).

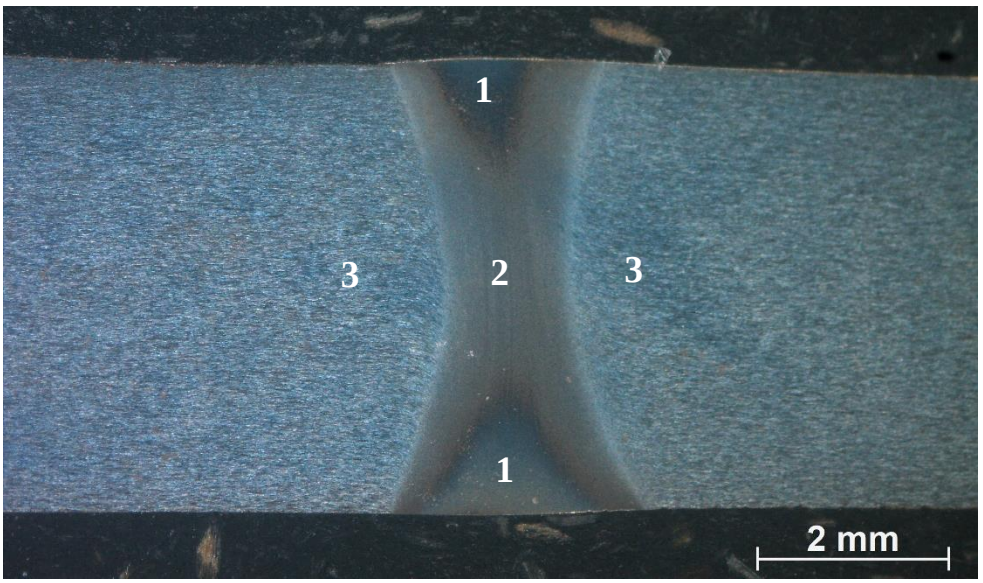


Figura 3: Macrografia da região longitudinal da junta soldada por fricção, com suas respectivas zonas microestruturais identificadas: zona 1 (zona termicamente afetada), zona 2 (centro de solda) e zona 2 (metal base).
Fonte: Autoria Própria

A zona 1, corresponde a região próxima da rebarba sendo essa uma região que sofreu resfriamento brusco durante o processo, apresentando microestrutura martensita não revenida, induzida pela deformação do processo de fricção, também chamado de FIM - Frictin Induced Martensite (LEE et al, 2020; SABOONI et al, 2015). A combinação entre o alto teor de carbono do arame, aliado ao aquecimento rápido e localizado, decorrente de deformações elevadas e alta taxa de extração de calor, acarretou na formação desta microestrutura percorrendo todo diâmetro do arame. A Figura 4, apresenta em maior ampliação esta microestrutura.

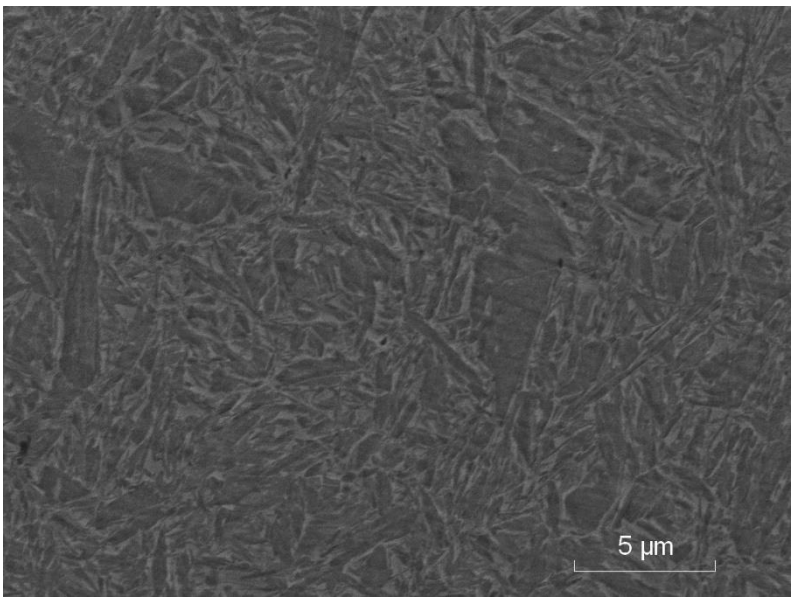


Figura 4: Microestrutura referente à zona 1. Martensita induzida por deformação
Fonte: Autoria Própria

A zona 2, que está localizada na faixa central de solda, apresenta grãos refinados de perlita fina lamelar e ferrita e pode ser visualizada com maior detalhe na Figura 5 (a). A Figura 5 (b), é a zona de metal base do arame, evidenciando novamente sua microestrutura característica de lamelas de perlita altamente deformada e bem definida (ZHOU et al, 2019).

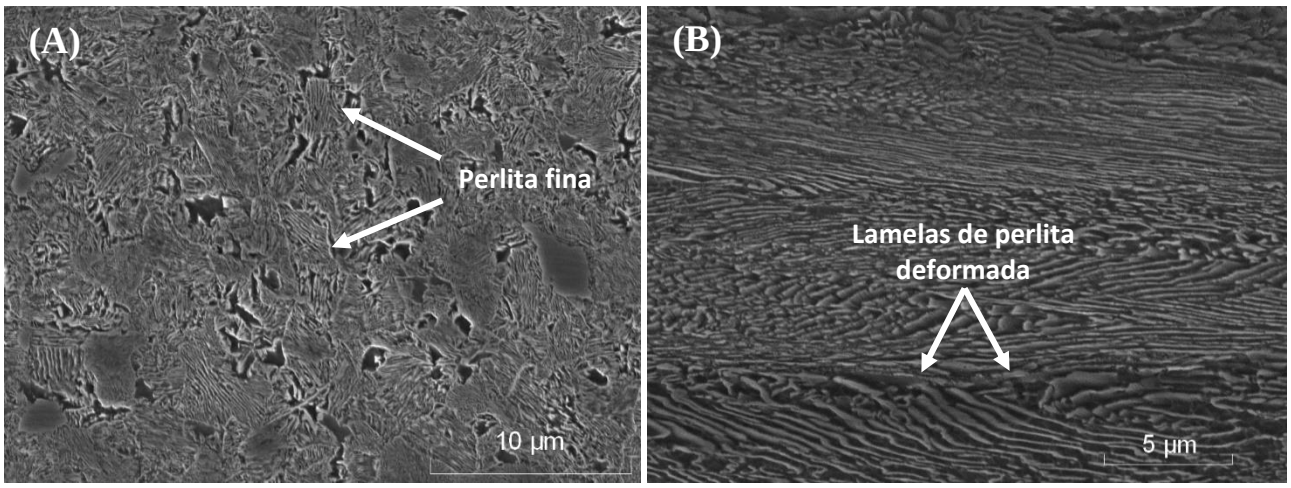


Figura 5: Microestrutura de grãos refinados de perlita e ferrita. Zona 2, centro de solda (a). Microestrutura com lamelas de perlita altamente deformada. Zona 3, metal base (b).
Fonte: Autoria Própria

O perfil de microdureza Vickers (HV_1) para cada zona microestrutural encontrada na junta soldada por fricção está exposto na Figura 6. A partir da curva é possível observar que a faixa intermediária da região soldada apresentou valores muito próximos, tendo apenas um aumento na região central, local em que os grãos de perlita estão mais refinados, em virtude da deformação plástica severa (região de interface) proveniente do processo. No entanto, é verificado que na região acima da solda, houve um aumento bastante expressivo de dureza, isto pode estar relacionado à formação da martensita não revenida induzida por deformação. Microestrutura caracterizada pela alta dureza, gerada pela alta taxa de resfriamento, como havia sido elucidada anteriormente.

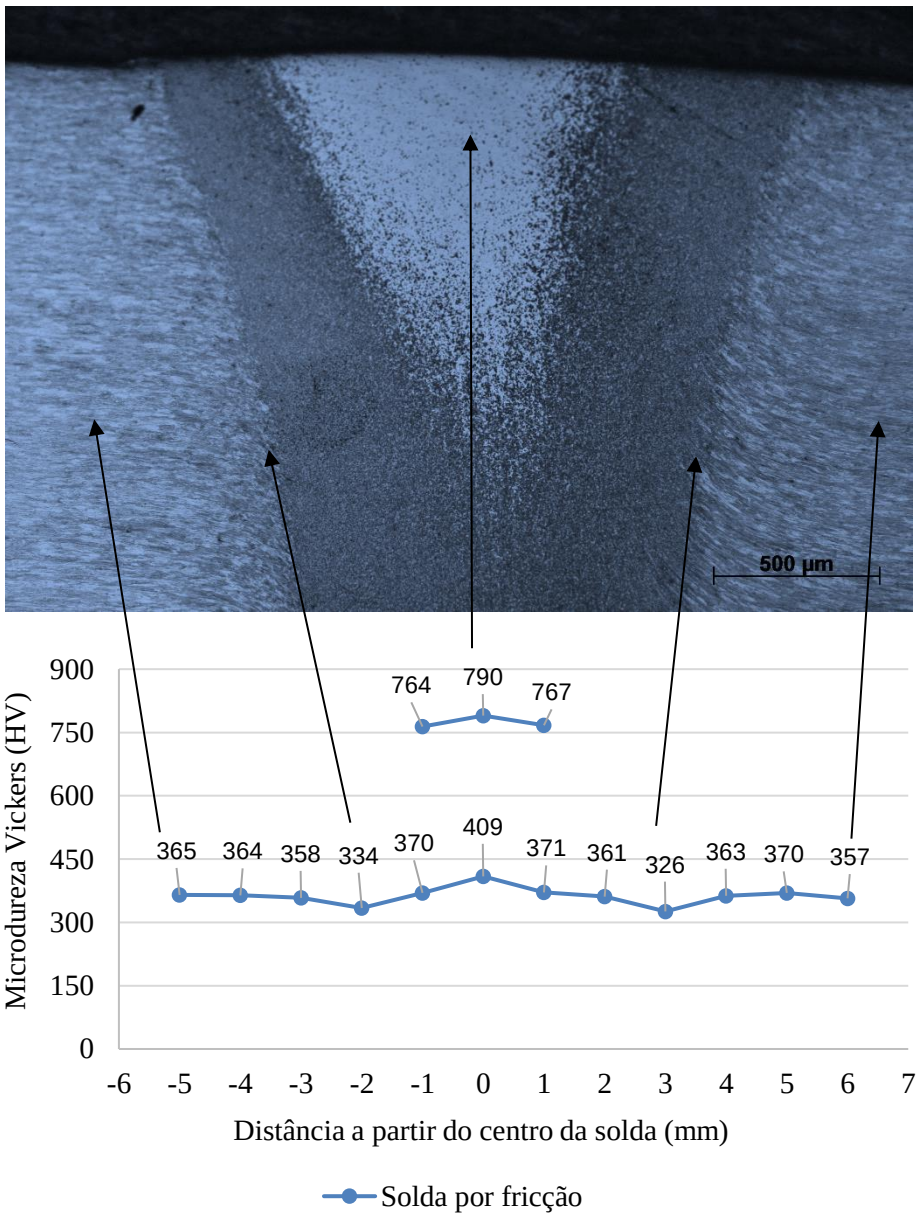


Figura 1 - Perfil de microdureza a partir da micrografia da solda por fricção.

Portanto, diante do perfil de microdureza exibido, observa-se que a faixa periférica da solda por fricção, que apresentou martensita com valores de microdureza média de 774 ± 14 HV_1. Este resultado comprova a formação de martensita na periferia da solda e remete à possibilidade de otimizar ainda mais esta solda por fricção, testando menores avanços para verificar se a zona de martensita pode ser reduzida ou até eliminada. Entretanto, mesmo que isto seja verificado, é necessário analisar se a eliminação da martensita compromete a resistência à tração da solda.

Os resultados do ensaio de tração apresentados na Tabela 2. Os valores médios encontrados de tensão de escoamento e resistência à tração foram 1088±6 MPa e 1315 ± 36 MPa, respectivamente. Avaliando esses resultados, pode-se afirmar que a solda por fricção se mostra promissora por apresentar bons valores de resistência à tração, estes valores podem estar relacionado à elevada dureza encontrada em virtude da formação da microestrutura martensítica.

Tabela 2 - Resultados do teste de tração dos arames soldados por fricção.

Velocidade (mm/min)	Corpo de prova	Tensão de Escoamento (MPa)	Resistência à tração (MPa)
3,7	CP 1	1094	1282
	CP 2	1082	1354
	CP 3	1090	1310
	Média	1088	1315
	Desvio Padrão	6	36

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostraram que a técnica de soldagem por fricção rotativa, apresentou pequena faixa de zona termicamente afetada (ZTA), característica esperada pelo que promete a técnica. No entanto, houve a formação de martensita não revenida que apresentou elevada dureza nessa faixa, porém esta microestrutura foi favorecida envolvendo outros fatores como o alto teor de carbono do material e alta taxa de extração de calor. Aplicando a técnica em arames com baixo teor de carbono e diminuindo a taxa de resfriamento, esta microestrutura pode não ser formada. Entretanto, quando analisado as propriedades mecânicas da solda, verificou-se que a formação da martensita induzida por deformação teve influência direta na alta dureza encontrada na faixa da ZTA, observando os valores de resistência à tração, este aumento de dureza pode ter influenciado no aumento da resistência.

Dentro desse contexto e dos resultados apresentados, a técnica apresentou ser bastante promissora para aplicações na indústria. Porém, deve ser aperfeiçoada e aplicada para outros arames com diâmetros e teores de carbono distintos, para de fato obter mais informações a cerca das suas propriedades.

5. AGRADECIMENTOS

- Agradecimento a MFX do Brasil pelo fornecimento de arames;
- A agência de fomento CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), que financiou a bolsa.

6. REFERÊNCIAS

AMAECHI, CHIEMELA VICTOR AND REDA, AHMED AND JA'E, IDRIS AHMED AND WANG, Chunguang and An, Chen (2022) guidelines on composite flexible risers: monitoring techniques and design approaches. Energies, 15 (14): 4982.

LEE, YOON-SEOK & KONDO, YUTA & OKAYASU, MITSUHIRO. (2020). Friction-Induced Martensitic Transformation and Wear Properties of Stainless Steel under Dry and Wet Conditions. Metals. 10. 743.

MIR R, A., NOOR Z, K., ARSHAD N, S., SAAD P., Friction based solid state welding – A review, *Materials Today: Proceedings*, Vol 62, pp. 55-62, 2022.

NASCIMENTO, BRENNO & TRINDADE, MATHEUS & REIS, MATHEUS & SILVA, ABRAÃO & GAMA, THIAGO & SILVA, SAMUEL & ANDRADE, JOSÉ & GRIZA, SANDRO. (2019). Análise de falha de arames de armadura de tração de umbilical submarino. 1257-1268. 10.5151/2594-5327-33381.

NASCIMENTO, BRENNO LIMA; TRINDADE, MATHEUS PORTO; REIS, MATHEUS MARIANO DA SILVA; LIMA, GUSTAVO DÓRIA; GAMA, THIAGO SANTANA; SILVA, SAMUEL DEOTERONIO DA; ANDRADE, JOSÉ FÁBIO ABREU DE; GRIZA, SANDRO. Proposta de metodologia simplificada para testes de fadiga em arames de armadura de umbilicais submarinos, p. 1269-1278. In: *74º Congresso Anual da ABM*, São Paulo, 2019. ISSN: 2594-5327.

REIS, MATHEUS MARIANO DA SILVA. Estudo de fragilização e propriedades mecânicas de arames utilizados em armadura de tração de cabos umbilicais soldados de topo por resistência e por fricção. 2023. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2023.

SABOONI, SOHEIL & KARIMZADEH, FATHALLAH & ENAYATI, MOHAMMAD HOSSEIN & NGAN, A.H.W. (2015). Friction-stir welding of ultrafine grained austenitic 304L stainless steel produced by martensitic thermomechanical processing. Materials & Design. 76.

YAN ZHOU, JI-LIANG MO, ZHEN-BING CAI, CHANG-GUANG DENG, JIN-FANG PENG, MIN-HAO ZHU. Third-body and crack behavior in white etching layer induced by sliding–rolling friction, Tribology International, Volume 140, 2019.